学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

物理学史



序

物理学发展史是一块蕴藏着巨大精神财富的宝地。这块宝地很值得我们去开垦，这些精神财富很值得我们去发掘。如果我们都能重视这块宝地，把宝贵的精神财富发掘出来，从中吸取营养，获得教益，我相信对我国的教育事业和人才培养都会是大有益处的。

值此郭奕玲、沈慧君两同志的《物理学史》一书出版之际，我想谈三点看法：

一、科学上没有平坦的大道。我们要通过物理学史的介绍，向学生讲清楚，科学经历的是一条非常曲折、非常艰难的道路。然而，我们的教师在对学生进行教育的时候往往是应用经过几次消化了的材料来讲授，或者经过抽象的理论分析加以表述，把已有的知识系统归纳，形成简明扼要的理论体系，这当然是必要的，但是这样的教学方法，往往会使学生对科学概念的产生和发展引起误解，以为什么结论都可用数学推导出来，失去了对观察和实验的兴趣。这样的结果使学生们不了解科学是怎样来的，时间长了，等到他自己从事教学时就很容易把科学当作一门死科学来教。今天我们科学界有一个弱点，这就是思想不很活泼，这也许跟大家过去受的教育有一定关系，我在 1981 年给《物理教学》编辑部的信中就提出过这个看法。

我认为，在物理教学中适当增加一点物理学史的内容，或者在教学计划中增加一门物理学史选修课，就象清华大学所做的那样，让学生更多地了解科学发展的历程，这对他们的成长将会是有益的。

二、通过物理学史可以阐明理论与实践的关系。物理学是实验科学，实验工作是基础。强调实验的意义，并不是否定理论的重要性，只有在实验的基础上建立了正确的、经得起实践检验的理论，才能由表及里达到对客观事物的规律性认识。如果能在系统地介绍理论发展线索的同时，更多地介绍实验工作的经过和所起的作用，以及理论与实验的相互依赖关系，就更有教育意义。郭奕玲、沈慧君两同志写的这本《物理学史》比较注意这些方面，在这本书里，不但全面探讨了这些关系，还就物理学每一分支的不同特点加以具体阐述。值得提到的是，书中专门设了“实验与实验室”和“单位、单位制与基本常数”两章，这就更丰富了有关实验的内容。

三、科学是全人类共同创造的社会财富。它是科学家集体智慧的结晶，是时代的必然产物。但它的每阶段的具体发展情况又往往要受到各种客观条件的影响。我们不否认科学家个人的伟大作用，但科学绝不是少数几个特别有天才的大科学家在头脑里凭空创造出来的，只有那些善于继承又勇于创新的科学家才有可能抓住机遇，作出突出贡献。机遇也可以说是一种偶然性，但是在偶然性中体现了必然性，物理学史中大量

事例可以说明，各种科学发现往往具有一个共同点，那就是勤奋和创新精神。只有不畏劳苦沿着陡峭山路攀登的人，才有希望达到光辉的顶点。

最后，我还想对青年同学们讲几句话：除了自然科学以外还应该学一点近代史和现代史、辩证唯物主义、历史唯物主义和毛泽东选集第二版。我们能在四十年中在经济建设、文化建设和国防建设上取得重大成绩，提高我国的国际地位，是与在中国共产党领导下发扬独立自主、自力更生、艰苦奋斗、大力协同，建设有中国特色的社会主义道路分不开的。为祖国的四个现代化作出贡献，我们更需要强调集体主义精神。

钱三强

1991.7.25.

前言

物理学史研究人类对自然界各种物理现象的认识史。它研究的是物理学发生和发展的基本规律、物理学概念和思想的发展和变革。它研究物理学是怎样成为一门独立学科，怎样不断开拓新领域，它的各个分支怎样互相渗透，怎样分化，怎样综合，怎样分化出新的学科，又怎样综合产生新的飞跃。

物理学象一座知识的宝塔，基础雄厚，力学、热学、电学、光学以至于相对论、量子力学、核物理和粒子物理学，形成了一座宏伟的大厦。它又象一棵大树，根深叶茂，从基根到树干长出茂密的枝叉，又结出累累果实。可以说，物理学是一门不断发展的科学，它向着物质世界的深度和广度进军，探索物质世界及其运动的规律。

通过物理学史的学习，不但能增长见识，加深对物理学的理解，更重要的是可以从中得到教益，得到启示，开阔眼界，从前人的经验中吸取营养，用以指导我们的工作，使我们少走弯路。

本书是在我们讲物理学史课程时所写讲义的基础上扩充而成的。课程原名物理学史专题讲座，是为清华大学本科生开设的选修课。之所以叫专题讲座，是因为在理工科大学没有那么多时间，也没有必要按步就班地进行系统地讲授。那样既乏味又费时间。如果有兴趣，可以自己找书看。我们认为，如其平铺直叙地罗列一大堆史实，不如抓住若干典型，进行个例剖析，讲得深透些。什么是个例剖析？我们指的是就某一个事件、某一项发现或某一位科学家的成就进行充分的揭示，说明其前因后果、来龙去脉，不仅说有什么，还要说为什么。例如，可以问一问：为什么会出现那样的事件？为什么会发生新的突破？为什么会造就伟大的人物？分析其成功的要素，总结其经验教训，提炼出可供大家共享的精神财富。所以我们选了十几个专题，每讲一个专题，分析一个例子，于是就叫专题讲座。讲座开了几届之后，又感到选修课不宜过专，不能让学生花费过多的精力阅读原始文献，但是有必要保留专题讲座的精华，即从个例剖析应该得到的各种有益的启示，这些启示并不是生硬灌输给学生，而是通过真实的历史、实际的资料、生动的情景把学生引向历史的场面，让他们自己去体会，自己去获取应该得到的启示。于是这门选修课就改名为《物理学史的启示》。总之，我们的宗旨是使学生或读者在对物理学史进行个例剖析的基础上，得到启示，受到鼓舞。

怎样进行个例剖析呢？

简单说来，就是在充分占有资料的前提下，沿着如下的线索进行研究：

■图 0–1 个例剖析示意图

我们用这张图来表示研究的方法。一条线代表时间，一条线代表人物的活动，一条线代表事件的发展经过。我们在全面地考察了人和事的发展经过之后，由远而近，把注意力聚焦在当事人作出发现的关键时刻，分析 6 个 W：

(1)Why？为什么会发生？一个物理事件之所以发生，必定有其历史背景和动因。

(2)What？事件的性质，有何特点？有何意义？在历史上起了什么作用？

(3)When？有什么时代特点？为什么在这个时候出现？有没有历史的必然性？

(4)Where？为什么在这个地方？是什么社会因素决定的？

(5)Who？分析人物的特点，他的成功要素。为什么会作出这个成果？

(6)How？他们是怎样作出成果的，所经的曲折和奋斗历程以及从中可以得到的启示。

我们将力求全面回答这些问题，从而尽可能深入地了解事件的历史背景和当事人取得成功的经验。每个课题都将围绕这 6 个问题(6 个 W)展开。当然，具体提出几个问题应视课题而异。例如，对于热辐射的研究我们可以提出如下几个问题：

(1)为什么量子假说会在热辐射这一领域首先提出？

(2)为什么人们对热辐射那样感兴趣？

(3)为什么量子假说是在德国而不是在别的国家首先提出？

(4)为什么是普朗克而不是别人？

这几个问题正是同学们常常提出的问题，如果能够找到正确答案，当然就会有所收获，从中得到有益的启示。

下面谈谈值得注意的几个关系：

1．基础科学和应用科学的关系

物理学是基础科学，也是正在发展中的科学。它是许多科学与技术的基础和发源地，也是革新改造某些科学技术的基本依据。所以，我们学习物理学、应用物理学、研究物理学，因为它是长远起作用的科学。从物理学史可以得到有力的启示，例如：电器和电机工业起源于电磁学，它们的革新改造依然离不开电磁理论和量子理论，超导的应用就是一例。

2．物理学中理论与实验的关系

物理学是以实验为本的科学。物理理论来源于实验，但又高于实验。正确处理理论与实验的关系，是物理学家成功的重要因素。什么叫实验？实验是人类有目的地在变革自然的过程中认识自然的一种手段，是人类发挥高度智慧的一种特殊的实践活动。要变革、要观测、还要用到各种仪器，但更不可缺少的是理论的指导和分析。通过物理学史的学习，可

以充分认识实验在物理学发展中的作用，端正对实验的认识，对以后大家的发展非常重要。前人的经验会给我们有益的启示。

3．科学与技术的关系

物理学的发展与技术有密切关系。如果没有真空技术、低温技术和电子技术,就不会有现代物理学。许多物理学家从事技术工作值不值得？算不算改行？可以说是改行，但值得。不仅值得，而且必要，因为有这个需要。技术的改造与发展，需要物理学家的合作。我们不要鄙视技术工作，也不要低估物理学的作用。许多工程技术人员重视物理学的学习，甚至参与物理学的研究，因为他们懂得物理学的重要地位，要真正在先进技术中找到突破口，往往要依靠物理学的新成就。激光技术、晶体管技术、超导技术、同位素技术、红外技术、生物工程技术，哪一门不是这样呢？

4．物理学与数学的关系

数学是物理学家的思维工具，只有通过数学才能最终以精确形式表达自然规律。只有通过数学才能抓住错综复杂的变化过程找到最基本、最普遍的规律。例如：没有对数，开普勒难以建立天文学的重要规律——开普勒三定律；没有微积分，牛顿得不出万有引力定律；没有统计学，无法发展分子运动论；没有黎曼张量，爱因斯坦的广义相对论不能完善。总之，物理学的发展离不开数学，而数学的发展也和物理学密切相关。然而有一点要特别提出的是：物理学不等于数学，物理学的发展也不仅靠数学，数学是一种形式逻辑，光靠逻辑推理，物理学是不能前进的，物理学史的学习会给我们充分的例证。

5．物理学和其他自然科学的关系

物理学和天文学、化学、地质学、生物学等自然科学，也有密切关系。牛顿力学的直接基础是天文学中的开普勒三定律；原子论起源于化学；近代化学靠的是量子理论。物理学史和科技史告诉人们，物理学和其他自然科学相结合，往往产生出很有生命力的边缘科学，例如：生物物理、激光化学、天体物理、地球物理等等。

6．物理学与哲学的关系

几百年前，物理学叫自然哲学，被人们看成是哲学的一部分。牛顿的一部经典著作就取名为《自然哲学的数学原理》，这是牛顿三定律和万有引力定律的发源地。物理学史的学习会告诉我们，许多物理学的新发现与哲学思潮有联系。能量守恒与转化定律的发现受康德哲学的影响，反过来又成了辩证唯物主义的重要依据之一。物理学的进展往往给哲学提供新鲜例证，而哲学也常对自然科学指出前进的方向。

还有一点要说明，物理学史是研究物理学的发展规律，不是物理学本身，不能代替物理学的学习。物理发展史除了涉及物理本身的内容，还涉及人和社会各方面的问题，所以物理学史和其他科技史一样，既是

自然科学的组成部分，也是社会科学的组成部分。

第一章　力学基本定律的形成

§1.1　历史概述

力学是物理学中发展最早的一个分支，它和人类的生活与生产联系最为密切。早在遥远的古代，人们就在生产劳动中应用了杠杆、螺旋、滑轮、斜面等简单机械，从而促进了静力学的发展。古希腊时代，就已形成比重和重心的概念，出现杠杆原理；阿基米德（Archimedes，约公元前 287—212）的浮力原理提出于公元前二百多年。我国古代的春秋战国时期，以《墨经》为代表作的墨家，总结了大量力学知识，例如：时间与空间的联系、运动的相对性、力的概念、杠杆平衡、斜面的应用以及滚动和惯性等现象的分析，涉及力学的许多部门。虽然这些知识尚属力学科学的萌芽，但在力学发展史中应有一定的地位。

16 世纪以后，由于航海、战争和工业生产的需要，力学的研究得到了真正的发展。钟表工业促进了匀速运动的理论；水磨机械促进了摩擦和齿轮传动的研究；火炮的运用推动了抛射体的研究。天体运行的规律提供了机械运动最纯粹、最精确的数据资料，使得人们有可能排除摩擦和空气阻力的干扰，得到规律性的认识。天文学的发展为力学找到了一个最理想的“实验室”——天体。但是，天文学的发展又和航海事业分不开，只有等到 16、17 世纪，这时资本主义生产方式开始兴起，海外贸易和对外扩张刺激了航海的发展，这才提出对天文作系统观测的迫切要求。第谷·布拉赫（Tycho Brahe， 1546—1601）顺应了这一要求，以毕生精力采集了大量观测数据，为开普勒（Johannes Kepler，1571—1630）的研究作了准备。开普勒于 1609 年和 1619 年先后提出了行星运动的三条规律，即开普勒三定律。

与此同时，以伽利略（Galileo Galilei， 1564—1642）为代表的物理学家对力学开展了广泛研究，得到了落体定律。伽利略的两部著作：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》（1632 年）和《关于力学和运动两种新科学的谈话》（简称《两门新科学》）（1638 年），为力学的发展奠定了思想基础。随后，牛顿（IsaacNewton，1642—1727）把天体的运动规律和地面上的实验研究成果加以综合，进一步得到了力学的基本规律，建立了牛顿运动三定律和万有引力定律。牛顿建立的力学体系经过 D.伯努利（Daniel Bernoulli，1700—1782）、拉格朗日（J.L.Lagrange，1736—1813）、达朗贝尔（Jean le Rond d ’Alembert，1717—1783）等人的推广和完善，形成了系统的理论，取得了广泛的应用并发展出了流体力学、弹性力学和分析力学等分支。到了 18 世纪，经典力学已经相当成熟，成了自然科学中的主导和领先学科。

机械运动是最直观、最简单、也最便于观察和最早得到研究的一种运动形式。但是，任何自然界的现象都是错综复杂的，不可避免地会有干扰因素，不可能以完全纯粹的形态自然地展现在人们面前，力学现象也不例外。因此，人们要从生产和生活中遇到的各种力学现象抽象出客观规律，必定要有相当复杂的提炼、简化、复现、抽象等实验和理论研究的过程。和物理学的其它部门相比，力学的研究经历了更为漫长的过程。从希腊时代算起，这个过程几达两千年之久。其所以会如此漫长，一方面是由于人类缺乏经验，弯路在所难免，只有在研究中自觉或不自觉地摸索到了正确的研究方法，才有可能得出正确的科学结论。再就是生产水平低下，没有适当的仪器设备，无从进行系统的实验研究，难以认识和排除各种干扰。例如：摩擦和空气阻力对力学实验来说恐怕是无处不在的干扰因素。如果不加分析，凭直觉进行观察，往往得到错误结论。亚里士多德（Aristotle，公元前 384—322）认为物体运动速度与外力成正比、重物下落比轻物快和后来人们用“冲力”解释物体的持续运动以及用“自然界惧怕真空”解释抽水唧筒的种种似是而非的论点，看起来确与经验没有明显的矛盾，所以长期没有人怀疑。而伽利略和牛顿的功绩，就是把科学思维和实验研究正确地结合到了一起，从而为力学的发展开辟了一条正确的道路。

§1.2　伽利略的运动学研究

1638 年，伽利略的《两门新科学》一书的出版，揭开了物理学的序幕。他在这本不朽的著作中整理并公布了三十年前他得到的一些重要发现。1639 年 1 月，这位年迈失明的作者口授了一封给友人的信，提到这本书时讲道[①]：“我只不过假设了我要研究的那种运动的定义及其性质，然后加以证实。……我声明我想要探讨的是物体从静止开始，速度随时间均匀增加的这样一种运动的本质。……我证明这样一个物体经过的空间（距离）与时间的平方成正比。……我从假定入手对如此定义的运动进行论证；因此即使结果可能与重物下落的自然运动的情况不符，对我也无关紧要。但是我要说，我很幸运，因为重物运动及其性质，一项项都与我所证明的性质相符。”他的这一席话对后人了解他在运动学研究上作出种种发现也许会很有益处。

1.2.1　伽利略为什么要研究自由落体

西方有句谚语：“对运动无知，也就对大自然无知。”运动是万物的根本特性。在这个问题上，自古以来，出现过种种不同的看法，形成了形形色色的自然观。在 16 世纪以前，亚里士多德的运动理论居统治地

[①] S.Drake,Sci.Am.228(1973—May) p.85

位。他把万物看成是由四种元素——土、水、空气及火组成，四种元素各有其自然位置，任何物体都有返回其自然位置而运动的性质。他把运动分成自然运动和强迫运动：重物下落是自然运动，天上星辰围绕地心作圆周运动，也是自然运动；而要让物体作强迫运动，必需有推动者，即有施力者。力一旦去除，运动即停止。既然重物下落是物体的自然属性，物体越重，趋向自然位置的倾向性也就越大，所以下落速度也越大。于是，从亚里士多德的教义出发，就必然得到物体下落速度与物体重量成正比的结论。

亚里士多德的理论基本上是错误的，但这一理论毕竟是从原始的直接经验引伸而来，有一定的合理成分，在历史上也起过进步作用，再加上被宗教利用，所以直到 16 世纪，仍被人们敬为圣贤之言，不可触犯。

正因为如此，批驳亚里士多德关于落体运动的错误理论，不仅是一个具体的运动学问题，也是涉及自然哲学的基础问题，是从亚里士多德的精神枷锁下解脱的一场思想革命的重要组成部分。伽利略在这场斗争中作出了非常重要的贡献。他认识到通过自由落体的研究打开的缺口，会导致一门广博的新科学出现。请读读他在《两门新科学》中核心的一章，即“第三天的谈话”，开头讲的一段话[①]：

“我的目的，是要阐述一门崭新的科学，它研究的却是非常古老的课题。也许，在自然界中最古老的课题莫过于运动了。哲学家们写的关于这方面的书既不少，也不小，但是我从实验发现了某些值得注意的性质，到现在为止还未有人观察或演示过。也做过一些表面的观察，例如观察到下落重物的自然运动是连续加速的，但还从未有人宣布过，这一加速达到什么程度；据我所知，还没有一个人指出，一个从静止下落的物体在相等的时间间隔里，保持按从 1 开始的奇数的比数。……

“我考虑更重要的是，一门广博精深的科学已经启蒙，我在这方面的工作只是它的开始，那些比我更敏锐的人所用的方法和手段将会探索到各个遥远的角落。”

1.2.2　近代科学诞生的前奏

伽利略于 1564 年出生在意大利一个贵族家庭里，从小爱好文艺和科学。他所处的时代正值文艺复兴之后思想大解放的时期，意大利是文艺复兴的发源地，思想非常活跃。其杰出代表达·芬奇（Leonard da Vinci，1452—1519）不仅是艺术家和工程师，还做过许多物理实验，主张在科学工作中多进行实验观察；波兰人哥白尼（Copernicus，1473—1543）主张日心说，公开向亚里士多德的信仰者挑战；英国人弗兰西斯·培根（Francis Bacon，1561—1626）大力宣传实验的重要性，极力反对经院哲学，为伽利略的工作鸣锣开道，可以说，他们是伽利略工作的前驱。

[①] Galileo Galilei,Two New Sciences,MacMillan,1914,p.153.

数学上也有人为新科学的诞生作了准备，13—14 世纪英国牛津大学的梅尔顿（Merton）学院集聚了一批数学家，对运动的描述作过研究，他们提出了平均速度的概念，后来又提出加速度的概念。不过，他们从未用之于落体运动。

亚里士多德关于重物下落速度快的结论与实际经验不符，理所当然会受到科学家的实验检验。就在伽利略所在的比萨（Pisa）也多次记载有落体的研究。例如，伽利略的一位老师，叫包罗（Giro– lamo Borro），是哲学教授，就曾在自己 1575 年发表的书中写道[①]：

“我们从窗口以同样的力投两个重量相同的物体，铅块慢于木块。”不过，铅块和木块可能是抛出窗外的。

1544 年，有一位历史学家记述了三个人曾对亚里士多德的落体思想表示怀疑。他们注意到亚里士多德的意见与实际经验不符。但书中没有描述具体的实验。

1576 年意大利帕都亚(Padua)有一位数学家叫莫勒第(G.Moletti)，写了一本小册子叫《大炮术》，也是以当时惯用的对话方式进行论述的。其中有一段明确地提到落体运动，请读下面一段对话[①]：

“王子：如果从塔顶我们放下两个球，一个是重 20 磅的铅球，另一个是重 1 磅的铅球，大球将比小球快 20 倍。

作者：我认为理由是充分的，如果有人问我，我一定同意这是一条原理。

王子：亲爱的先生，您错了。它们同时到达。我不是只做过一次试验，而是许多次。还有，和铅球体积大致相等的木球，从同一高度释放，也在同一时刻落到地面或土壤上。

作者：如果高贵的大人不告诉我您做过这样的试验，我还会不相信呢！那好，可是怎样拯救亚里士多德呢？

王子：许多人都设法用不同的方法来拯救他，但实际上他没有得到拯救。老实告诉您，我也曾以为自己找到了一个办法来拯救，但再好好思考，又发现还是救不了他。”

由此可见，关于落体问题的讨论在伽利略 1589 年当比萨大学教授之前已经广泛展开了，并且已有人作过实验，得到的结果其实是尽人皆知的生活经验。问题在于，没有人敢于触犯亚里士多德的教义。因为亚里士多德的理论指的是落体的自然运动，即没有媒质作用的自由落体运动，这是一种理想情况，在没有真空泵的 16 世纪谁都没有可能真正做这类实验。

[①] T.B.Settle Galileo and Early Experimentation in R.Ariset al(eds.)，Springs of Scientific Creativity(Minnesota,1983)p.7.

[①] 同上一页注释，p.10.

1.2.3 伽利略的落体实验

关于伽利略的比萨斜塔实验，传说纷纭。有人说，他这个落体实验对亚里士多德的理论是致命一击，由此批驳了亚里士多德的落体速度与重量成正比的说法，得出落体加速度与其重量无关的科学结论；有人说，他用大小相同而重量不等的两个球，得到同时落地的结果；甚至有人说他是用炮弹和枪弹做实验的。有人则过分宣扬伽利略的落体实验，说他是第一个做落体实验的人。

然而，伽利略在《两门新科学》中，并没有提到他在比萨斜塔做过实验。有关这个实验的说法大概来自他晚年的学生维维安尼（Viviani，1622—1703）在《伽利略传》中的一段不准确的回忆。这篇传记是在伽利略死后十几年即 1657 年出版的。其中有这样一段记述[①]：

“使所有哲学家极不愉快的是，通过实验和完善的表演与论证，亚里士多德的许多结论被他（指伽利略）证明是错的，这些结论在他之前都被看成是神圣不可冒犯的。其中有一条，就是材料相同，重量不同的物体在同样的媒质中下落，其速率并不像亚里士多德所说的那样，与其重量成正比，而是以相等的速率运动。伽利略在其他教授和全体学生面前从比萨斜塔之顶反复地做了实验来证明这一点。”

这里要说明几点：

1．维维安尼并没有亲眼看见伽利略做斜塔实验，因为伽利略死时（1642 年），他才 20 岁。他来到伽利略身边时（1639 年），伽利略已经双目失明，只能口授了。所以，维维安尼的记述可能不确实。

2．伽利略如果真的做了斜塔实验，时间大概是在 1589—1592 年他在比萨大学任教之际，可是，有人找遍当年比萨大学的有关记录，均未发现载有此事。

3．如果真有此事，也只能算是一个表演，不可能通过这个表演对两千年的传统学术进行判决。

那么，究竟伽利略有没有做过落体实验呢？经查考，在伽利略早年（1591 年）写的《论运动》(DeMotu)的小册子中确实记载有这类实验。不过，直到伽利略去世二百年后，即 1842 年，才整理发表，维维安尼并不知道这个小册子。这个实验也不像维维安尼所说的，是要彻底批驳亚里士多德的落体理论，而是为了弥补亚里士多德理论的缺陷。伽利略在这本小册子里用阿基米德的浮力定律来说明在媒质中落体的运动。他写道[①]：

“但是他（指亚里士多德）甚至犯了一个更大的错误，他假定物体的速率取决于越重的物体分开媒质的本领越大。因为，正如我们证明了

[①] S.Drake,Galileo at work,University of Chicago,1978,p.19.

[①] Galileo Galilei,On Motion and on Mechanics,Univ.of Wisconsin,1960, p. 48.

的，运动物体的速率并不取决于这一点，而是取决于物体重量与媒质重量差值的大小。”

伽利略当时显然仍然相信，同样大小的物体在空气中下落，较重的比较轻的快，因为他写道：

“……我们得到的普遍结论是：在物体材料不同的情况下，只要它们大小相同，则它们（自然下落）运动的速率之比，与它们的重量之比是相同的。”

他甚至还为实际观测所得结果与上述结论不符进行辩护，他写道：

“如果从塔上落下两个同体积的球，其中之一比另一个重一倍，我们会发现重的到达地面并不比轻的快一倍。其实，在运动开始时，轻物会走在重物的前面，在一段距离内要比重物快。”

这件事引起了现代科学史家的兴趣。究竟伽利略是否真的看到了轻物先于重物下落？ 1983年,塞特尔(T.B.Settle)和米克利希(R.Miklich)做了两球同时下落的实验[①]，用高速摄影机拍照，果然重现了伽利略观察到的现象，不过他们不是用机械释放两球，而是用两手分别握着两个球，并且必须手心向下，同时释放。实验判明，伽利略所得轻物走在重物前面的结论，是由于他握重球的手握得更紧，释放时略为缓慢所致。

这件事说明了，伽利略的思想不是从天上掉下来的，他经历了曲折的摸索过程。开始，他甚至还是亚里士多德的维护者。搞清这位近代科学的创始人的思想发展过程当然是一件有重大意义的课题。科学史家们正在利用各种史料进行研究。

1.2.4 伽利略的斜面实验

在伽利略的落体运动定律的形成过程中，斜面实验起过重要作用。他在《两门新科学》中对这个实验描述得十分具体，写道[②]：

“取长约 12 库比（1 库比＝45.7 厘米）、宽约半库比，厚约三指的木板，在边缘上刻一条一指多宽的槽，槽非常平直，经过打磨，在直槽上贴羊皮纸，尽可能使之平滑，然后让一个非常圆的、硬的光滑黄铜球沿槽滚下，我们将木板的一头抬高一、二库比，使之略呈倾斜，再让铜球滚下，用下述方法记录滚下所需时间。我们不止一次重复这一实验，使两次观测的时间相差不致超过脉搏的十分之一。在完成这一步骤并确证其可靠性之后，就让铜球滚下全程的 1/4，并测出下降时间，我们发现它刚好是滚下全程所需时间的一半。接着我们对其他距离进行实验，用滚下全程所用时间同滚下一半距离、三分之二距离、四分之三距离或任何部分距离所用时间进行比较。这样的实验重复了整整一百次，我们往

[①] T.B.Settle,Galileo and Early Experimentation in R.Aris et al(eds.), Springsof Scientific Creativity,(Minnesota，1983)p.7.

[②] Galileo Galilei,Two New Sciences,Mac Millan,1914,p.179—180.

往发现，经过的空间距离恒与所用时间的平方成正比例。这对于平面（也即铜球下滚的槽）的各种斜度都成立。我们也观测到，对于不同的斜度，下降的时间互相间的关系正如作者预计并证明过的比例一样。

“为了测量时间，我们把一只盛水的大容器置于高处，在容器底部焊上一根口径很细的管子，用小杯子收集每次下降时由细管流出的水，不管是全程还是全程的一部分，都可收集到。然后用极精密的天平称水的重量；这些水重之差和比值就给出时间之差和比值。精确度如此之高，以至于重复许多遍，结果都没有明显的差别。”

这个实验设计是安排得何等巧妙啊！许多年来，人们都确信伽利略就是按他所述的方案做的。在历史博物馆中甚至还陈列着据说是伽利略当年用过的斜槽和铜球。

但是，当人们重复伽利略上述实验时，却发现很难得到如此高的精确度。更不能使斜槽的倾斜度任意提高。有人证明，贴了羊皮纸的木槽，实验误差反而更大了。20 世纪中叶，科学史专家库依雷（Koyré）提出一种见解，认为伽利略的斜面实验和他在书上描述的其它许多实验一样，都是虚构的，伽利略的运动定律源于逻辑推理和理想实验。这个意见对 19 世纪传统的看法无疑是一贴清醒剂。因为长期以来形成了一种认识，把实验的作用过于夸大了，好像什么基本定律，包括伽利略的运动定律都是从数据的积累中总结出来的。这种机械论的观点到了 20 世纪理所当然要受到怀疑论者批评。

然而，伽利略究竟有没有亲自做过斜面实验呢？他为什么会想到用斜面来代替落体？他是怎样做的斜面实验？这个实验在他的研究中起了什么作用？

伽利略没有对自己的工作作过更详细的阐述。但是，他留下了大量手稿和许多著作。人们把他的资料编成了 20 卷文集，这是研究伽利略的宝贵史料。

从 1591 年伽利略的那本没有及时发表的小册子《论运动》中可以看出，伽利略很早就对斜面感兴趣了。他在那里主要研究斜面上物体的平衡问题，但也提过下列问题：①为什么物体在陡的平面上运动得更快？②不同的斜面上，运动之比如何？为了使问题更明确，他画了一张图（如图 1–1）。他问道：为什么沿 AB 下落最快，沿 BD 快于 BE，而慢于 AB？沿 AB 比沿 BD 快多少？他的回答是[①]：

“同样的重量用斜面提升比垂直提升可以少用力，这要看垂直提升与倾斜提升的比例。因此，同一重物垂直下落比沿斜面下降具有更大的力，这要看斜面下降的长度与垂直下落的长度成什么样的比例。”

■图 1–1 伽利略研究斜面用图

[①] W.L.Wisan,Arch.Hist.Exa. Sci.,13(1974)p.152.

既然力的大小与斜度成一定比例，落体运动的研究就可以用斜面来代替，按一定比例“冲淡”作用的力，“加长”运动的距离，这样可以比落体更有效地研究运动的规律。

人们从伽利略的手稿中找到了一些证据，证明他早年确曾做过斜面实验。其中有一页手稿画着一幅草图，两个小球正沿不同斜度的斜面向下运动，说明伽利略曾思考过斜面实验。另一页手稿（如图 1–2）上记录有如下数据[②]：

■图 1–2　伽利略的数据手稿

第三列数字是伽利略根据测量数据计算所得。

经过查核，证明伽利略选取的长度单位是 Punti，1punti 大约等于 29/30 毫米，最大的距离为 2104 Punti，相当于 2 米。进一步研究，发现要能在 2 米长的斜面内取得 8 个相继时间内物体（也许是小球）通过的距离，角度必须限制在 1.5°至 2°之间。

从纸张的特点可以判定这页数据大约记于 1604 年。此时看来伽利略还没有确定时间平方关系，因为记录上的第一列数据 1、4、9、16……64 显然是后加上去的。第三列的数据有几个地方涂改，似乎是伽利略在实验之后对数据作了修正。这些判断有助于说明伽利略的时间平方关系并不是直接从实验得到，而是从别的渠道先有了设想，再用实验加以验证的。

伽利略在这个实验里测量时间的办法肯定也与《两门新科学》中他的描述不同，因为靠称量水重无法取相继的时间间隔。他可能是用乐器的节拍报时，因为他擅长琵琶。这个实验不需要知道时间的绝对值，根据节拍把小球挡住就可以了。

1.2.5　伽利略推证落体定律

伽利略是怎样领悟到落体定律中的时间平方关系的呢？还要拉回到伽利略对亚里士多德运动理论的批判。

在《两门新科学》中，伽利略借他的化身萨尔维阿蒂(Salviate)的谈话，批驳物体下落速度与重量成正比的说法[①]。

“萨：如果我们取两个自然速率不同的物体，把两者连在一起，快者将被慢者拖慢，慢者将被快者拖快。您同意我的看法吗？

辛：毫无疑问，您是对的。

萨：但是假如这是真的，并且假如大石头以 8 的速率运动，而小石头以 4 的速率运动，两块石头在一起时，系统将以小于 8 的速率运动，但是两块石头拴在一起变得比原先速率为 8 的石头更大，所以更重的物体反而比更轻的物体运动慢，这个效果与您的设想相反。”

[②] S.Drake,Galileo at Work,University of Chicago,1978,p.87.

[①] Galileo　Galilei,Two　New　Sciences,MacMillan,1914, p.62.

接着，伽利略又否定了亚里士多德把运动分成自然运动和强迫运动的分类方法，而是从运动的基本特征量：速度和加速度出发，把运动分成匀速运动和变速运动。

他选择了最简单的变速运动来表示落体运动，这就是匀加速运动。为什么作这样的选择呢？他解释说[②]：

“在自然加速运动的研究中，自然界就象在所有各种不同的过程中一样亲手指引我们，按照她自己的习俗，运用最一般、最简单和最容易的手段……

“所以当我观察原先处于静止状态的一块石头从高处下落，并不断获得新的速率增量时，为什么我不应该相信这样的增加是以极其简单的对任何人都很明显的方式进行的呢？”

这一信念促使伽利略按匀加速运动的规律来处理落体运动。

但是在定义匀加速运动时，他似乎走了一段弯路。起初，他也跟别人一样，假设下落过程中物体的速度与下落距离成正比，即 $v \propto s$。他又是通过理想实验作出了正确的判断。他假设物体在落下第一段距离后已得到某一速度，于是在落下的距离加倍时，速度也应加倍。果真如此的话，则物体通过两段距离所用的时间将和通过第一段距离所用时间一样。也就是说，通过第二段距离不必花时间，这显然是荒谬的。于是伽利略转而假设物体的速度与时间成正比，即 $v \propto t$。这样的假设是否正确，当然也要进行检验。

然而速度是难以直接测量的。于是伽利略借助于几何学的推导，得出 $s \propto t^2$ 的关系，这就是时间平方定律。对于不同的时间比 1：2：3：4…，物体下落的距离比为 1：4：9：16…。这些数字正是伽利略在那张实验记录上添加的第一列数字。从第一列数和第三列数的比例关系，伽利略证明沿斜面下降的物体正在作匀加速运动。

从以上论据当然还不足以判定伽利略发现落体定律的全过程，但是已经可以窥视到伽利略研究运动学的方法。他把实验和数学结合在一起，既注重逻辑推理，又依靠实验检验，这样就构成了一套完整的科学研究方法。如果表成程序，伽利略的方法大致如下：



伽利略把实验与逻辑推理和谐地结合在一起，有力地推动了科学的发展。正如他在《两门新科学》第三天谈话结束时说的那样[①]：“我们可以说，大门已经向新方法打开，这种将带来大量奇妙成果的新方法，在

[②] 同上，p.160.

[①] Galileo Galilei,Two New Sciences,MacMillan,1914, p.243.

未来的年代里定会博得许多人的重视。”

从伽利略研究运动学这一历史片断，我们可以得到什么启示呢？

首先，由于历史资料的深入发掘和研究，我们对近代科学的诞生有了进一步的认识。那种认为伽利略靠落体实验就奠定了运动学基础的说法显然过于简单，不符合历史的本来面目。怀疑论者猜测伽利略没有实际做过他所描述的实验，认为他靠的是推理思辨，这一说法又为新近发现的手稿所驳斥。看来，伽利略创立运动学理论的过程相当复杂，既有思辨，又有实验，他依靠的是思辨和实验的相互印证、相互补充。这种看法，丝毫无损于伽利略这位近代科学先驱的光辉形象，反而使他更能得到后人的理解，让后人认识到他作为古代自然哲学和近代科学之间的过渡人物，为创建近代科学走的是一条多么艰辛的道路。

其次，承认伽利略在研究运动学的过程中思辨（逻辑思维）起重要作用，并不否定实验在物理学发展中的地位。实验的设计和实现总有一定目的，离不开指导思想。从伽利略真正做过的落体实验和斜面实验可以证明这一点。那种鼓吹单纯依靠实验数据的积累就足以获得客观规律，从而奠定科学基础的说法是站不住脚的。强调这一点，并不会否定实验本身，只是否定 19 世纪盛行的机械论观点；也不会抹煞历史上著名实验的作用，而是要提倡对实验的历史作更透彻的研究，分析它们的动因、设计思想、历史背景、内容的复杂性和先驱们的探索精神，以及结论的得出和影响等各个方面，这样做肯定会对实验的意义获得更充分的认识。

我们在这门课程一开头，特意安排这一节比较详细地介绍伽利略的运动学研究，是想让读者了解科学史研究的新进展，认识到科学史（包括物理学史）是一门严谨的科学。只有占有足够充分的、真实可靠的史料才能对历史事件作出恰当的分析，来不得半点虚构和武断。这门科学本身也在成长之中，甚至目前还很年轻，但它可以帮助人们认识科学发展的规律，从历史的回顾探索未来，对科学事业的发展具有一定的指导意义。

§1.3　惯性定律的建立

惯性定律是牛顿力学的重要基石之一，从亚里士多德的自然哲学转变到牛顿的经典力学，最深刻的变化就在于建立了惯性定律。前者认为一切物体的运动都是由于其它物体的作用；而后者认为“每一个物体都会继续保持其静止或沿一直线作等速运动的状态，除非有力加于其上，迫使它改变这种状态。”这就是牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中，作为第一条公理提出的基本原理。

1.3.1 古代的认识

牛顿在他的手稿《惯性定律片断》中写道：“所有那些古人知道第一定律，他们归之于原子在虚空中直线运动，因为没有阻力，运动极快而永恒。”这里所谓的古人，可以追溯到古希腊时代，德漠克利特（Democritus，公元前460—371）、伊壁鸠鲁（Epicurus，公元前342—270）都有这样的看法。例如，伊壁鸠鲁就说过：“当原子在虚空里被带向前进而没有东西与他们碰撞时，它们一定以相等的速度运动。”应该指出，不论是古希腊的哲学家还是后来他们的信徒，都无法证实这条原理，只能看成是猜测或推想的结果。

亚里士多德则断言，物体只有在一个不断作用者的直接接触下，才能保持运动，一旦推动者停止作用，或两者脱离接触，物体就会停止下来。这种说法似乎与经验没有矛盾，但是显然经不起推敲。例如，对于抛射体的运动，亚里士多德解释说，之所以抛射体在出手后还会继续运动，是由于手或机械在作抛物动作中同时也使靠近物体的空气运动，而空气再带动物体运动。但是，在亚里士多德的思辨中，不可避免地会出现漏洞。人们要问，空气对物体的运动也会有阻力作用，为什么有的时候推力大于阻力，有的时候阻力又会大于推力？

尽管亚里士多德被奉为圣贤，他的学说在中世纪还是不断有人批驳，逐渐被新的见解所代替。

1.3.2 中世纪的学说

6世纪希腊有一位学者对亚里士多德的运动学说持批判态度,他叫菲洛彭诺斯(J.Philoponus)。他认为抛体本身具有某种动力，推动物体前进，直到耗尽才趋于停止，这种看法后来发展为“冲力理论”。代表人物是英国牛津大学的威廉（William of Ock– ham,1300—1350），他认为，运动并不需要外来推力，一旦运动起来就要永远运动下去。他写道：“运动并不能完全与永恒的物体区分开，因为当可以用较少的实体时，就无需用更多的实体……。没有这一额外的东西，就可以对各种运动给予澄清。”例如，关于抛射体运动，他解释为：“当运动物体离开投掷者后，是物体靠自己运动，而不是被任何在它里面或与之有关的动力所推动，因为无法区分运动者和被推动者。”[①]他举磁针吸铁为例，说明要使铁运动并不一定直接接触，并且还进一步设想，这种情况在真空中也能实现，可见亚里士多德认为真空不存在的说法是可疑的。

当然，威廉的说法并不等于惯性原理，但是却是走向惯性原理的重要步骤。因为，如果运动不需要原因，一旦发生就要永远持续，亚里士多德的推动说就要从根本上受到动摇。

巴黎大学校长布里丹（F.Buridan,1300—1358）也是批判亚里士多德运动学说的先行者。他反对空气是抛射体运动的推动者，亚里士多德

[①] A.Franklin,Am.J.Phys.44,(1976)p.537.

对抛射体的解释是：在抛射体的后面形成了虚空区域，由于自然界惧怕虚空，于是就有空气立即填补了这一虚空区域，因而形成了推力。布里丹反问道：“空气又是受什么东西的推动呢？显然还有别的物体在起作用，这样一连串的推动根源何在呢？他又举出磨盘和陀螺为例，它们转动时无前后之分。两支标枪：一支两头尖，另一支一头尖一头钝，然而投掷时并不见得前者慢后者快。水手在船上，只感到迎面吹来的风，而不感到背后推动的风。这些都说明：“空气持续推动抛射体”的说法不符合事实。于是他提出“冲力理论”，认为：“推动者在推动一物体运动时，便对它施加某种冲力或某种动力。”

布里丹的工作有两个人继续进行,一位是Saxony的阿尔伯特(Albert,1316—1390），另一位是奥里斯姆（Nicholas Oresme,1320—1382），他是布里丹的学生。他们发展了冲力理论，阿尔伯特运用冲力来说明落体的加速运动，认为速度越大，冲力也越大，他写道[①]：

“根据这个（理论）可以这样说，如果把地球钻通，一重物落入洞里，直趋地心，当落体的重心正处于地心时，物体将继续向前运动（越过地心），因为冲力并未耗尽。而当冲力耗尽后，物体将回落。于是将围绕地心振荡，直到冲力不再存在，才重又静止下来。”

请注意，阿尔伯特这个例子后来伽利略在《两大世界体系》中也有讨论，可见布里丹、阿尔伯特、奥里斯姆等人的早期工作为伽利略和牛顿开辟了道路。不论是伽利略，还是牛顿，都在自己的著作中留下了冲力理论的烙印。

1.3.3 伽利略的研究

伽利略在自己的著作中多次提出类似于惯性原理的说法,例如在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》（1632年）中，[①]：

“只要斜面延伸下去，球将无限地继续运动，而且在不断加速，因为运动着的重物的本性就是这样。”

再请读他的作品中的另一段对话[②]：

“萨：…如果没有引起球体减速的原因……你认为球体会继续运动到多远呢？

辛：只要平面不上升也不下降，平面多长，球体就运动多远。

萨：如果这样一个平面是无限的，那末，在这个平面上的运动同样是无限的了，也就是说，永恒的了。…”

在另一本著作《两门新科学》（1638年）中，伽利略再次表述了惯性定律，他用图1–3中小球的运动来说明他的见解。假设沿斜面AB落下

[①] 同上页注，p.539—540.

[①] 伽利略，《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，上海人民出版社，1974年。

[②] 同上注。

的物体，以 B 点得到的速度沿另一斜面 BC 向上运动，则物体不受 BC 倾斜的影响仍将达到和 A 点同样的高度，只是需要的时间不同而已。

■图 1–3　伽利略关于斜面运动的插图

但是，伽利略又同时认为，等速圆周运动也是惯性运动，并进而论证行星正是由于按圆周轨道作等速运动才能永恒地运转，而他的直线运动实际上只限于沿着水平面的运动，所以并没有正确地表达惯性定律。

1.3.4 笛卡儿的工作

1644 年，笛卡儿（Rene Descartes，1596—1650）在《哲学原理》一书中弥补了伽利略的不足。他明确地指出，除非物体受到外因的作用，物体将永远保持其静止或运动状态，并且还特地声明，惯性运动的物体永远不会使自己趋向曲线运动，而只保持在直线上运动，他表述成两条定律：

（一）每一单独的物质微粒将继续保持同一状态，直到与其它微粒相碰被迫改变这一状态为止；

（二）所有的运动，其本身都是沿直线的。

他在给友人麦森(Mersenne)的信（1629 年）中就已断言：“我假设，运动一旦加于物体，就会永远保持下去，除非受到某种外来手段的破坏。换言之，某一物体在真空中开始运动，将永远运动并保持同一速度。”

笛卡儿比其他人高明的地方就是认识到惯性定律是解决力学问题的关键所在，是他最早把惯性定律作为原理加以确立，并视之为整个自然观的基础，这对后来牛顿的综合工作有深远影响。

然而，笛卡儿只停留在概念的提出，并没有成功地解决力学体系问题，而牛顿对惯性定律的认识也经过了一番曲折，直到 1687 年撰写《自然哲学的数学原理》之际，才摆脱旧观念的束缚，把惯性定律作为第一原理正式提了出来。

§1.4　万有引力定律的发现和牛顿的综合

1687 年，牛顿发表了《自然哲学的数学原理》。这部巨著总结了力学的研究成果，标志了经典力学体系初步建立。这是物理学史上第一次大综合，是天文学、数学和力学历史发展的产物，也是牛顿创造性研究的结晶。在这一节中我们主要想追溯牛顿作出人类史上如此丰功伟绩的渊源和他的创造过程。

牛顿所处的时代背景已如前述，他的生平也已有许多专著作了介绍，在此毋庸赘述。

1.4.1　苹果的故事

[①] R.Dugas, A History of Mechanics,Routledge ＆ Kegan Paul,1955,p.160.

苹果落地的故事早已脍炙人口。根据牛顿的信件，可以证明在他年轻的时候（1665—1666 年）因瘟疫在乡下居住时，确曾研究过数学和天文学，并思考过引力问题，他写道[①]：

“在 1665 年的开始，我发现计算逼近级数的方法，以及把任何幂次的二项式归结为这样一个级数的规则。同年 5 月间，我发现了计算切线的方法，……11 月间发现了微分计算法；第二年的 1 月发现了颜色的理论，5 月开始研究积分计算法。这一年里我还开始想到重力是伸向月球的轨道的，同时在发现了如何来估计一个在天球内运动着的天体对天体表面的压力以后，我还从开普勒关于行星的周期是和行星轨道的中心距离的 3/2 次方成正比的定律，推出了使行星保持在它们的轨道上的力必定要和它们与它们绕之而运行的中心之间的距离的平方成反比例。而后把使月球保持在它轨道上所需要的力和地球表面上的重力作了比较，并发现它们近似相等。所有这些发现都是在 1665 年和 1666 年的鼠疫年代里作出来的。”

这封信写于 1714 年，二百多年来，人们都是根据这封信以及其他一些文献资料来说明牛顿的创造经过的。这封信虽然没有提到苹果的故事，但是说明至少在《原理》发表 22 年以前，牛顿就已经开始了引力问题的思考。

人们要问：既然在 1665—1666 年牛顿就已经推算出了引力的平方反比定律，为什么迟了二十多年才发表？过去流传了种种解释。

有人说，牛顿当时推算的结果由于地球半径的数据不够准确误差过大，出于谨慎等待了 20 年。

有人说，牛顿的推算只是证明了圆形轨道的运动，而行星的轨迹是椭圆，他当时无法计算，只有等到他本人发明了微积分之后，才能有效地解决这个问题。

也有人说，牛顿观察苹果落地的故事也许确有其事，因为牛顿晚年至少向四个人讲到这件事，而他当时也确在思考引力问题。他肯定想到要把重力延伸至月球。

还有人说，牛顿 1714 年的那封信有意歪曲历史，是故意编造的，同样，苹果落地的故事，也是出自牛顿本人和他的亲属的编造，他们大概是出自辩护优先权的需要。

长期以来，（牛顿的《原理》已经发表整整三百年了），有关牛顿的著作甚少。牛顿的手稿一直被搁置一边，既未得到研究，也未公开发表，直到近几十年，对牛顿的研究才活跃起来，牛顿的书信和手稿陆续整理出版，研究牛顿的书刊不断问世，出现了好几位以研究牛顿闻名于世的科学史专家以及他们的学派。他们对过去的一些误传进行了考证，

[①] 塞耶编，牛顿自然哲学著作选，上海人民出版社，1974 年。

对《原理》一书的背景作了系统的研究，对牛顿的生平和创造经过进行了分析。现在我们可以更全面地、更正确地也更深刻地阐述牛顿的工作了，这里仅就牛顿发现万有引力定律的经过作些介绍，读者也许会发现，这一经过要比苹果落地的故事更富有戏剧性。

1.4.2　牛顿的早期研究

牛顿在大学学习期间，接触到亚里士多德的局部运动理论，后来，又读到伽利略和笛卡儿的著作，受他们的影响，开始了动力学的研究。开普勒和布里阿德（I.Bulliadus，1605—1694）的天文学工作启示了他对天文学的兴趣，使他产生了证明布里阿德的引力平方反比关系的想法，布里阿德曾在 1645 年提出一个著名假设，从太阳发出的力，应与距太阳的距离的平方成反比例；而开普勒则猜想太阳与行星之间靠磁力作用。1664 年上半年，牛顿摆脱了亚里士多德的影响，转而接受伽利略重视实验和数学的观念。笛卡儿关于寻求“自然的第一原因”的思想，也大大激励了牛顿。惯性定律、碰撞规律和动量守恒、以及圆周运动的解析，就是直接从笛卡儿的著作中学习到的成果。

在牛顿的手稿中，令人特别感兴趣的，是他在 1665—1666 年写在笔记本上未发表的论文。在这些手稿中，提到了几乎全部力学的基础概念和定律，对速度给出了定义，对力的概念作了明确的说明，实际上已形成了后来正式发表的理论框架。他还用独特的方式推导了离心力公式。

离心力公式是推导引力平方反比定律的必由之路。惠更斯（Christian Huygens，1629—1695）到 1673 年才发表离心力公式。牛顿在 1665 年就用上这个公式，肯定是他自己独立作出的成果。然而问题在于，他这时是从什么角度来认识离心力的呢？

下面让我们根据他未发表的手稿来追溯他推导离心力公式的思路吧[①]。

1．牛顿在分析圆周运动和推求离心力时，考虑有一小球在空心的球面上运动，如图 1–4。这个物体必受一指向中心 n 的力作用。他先考虑半个圆周，物体受力可以用一内接正方形的两条边来求，牛顿用下式表示：

$$\frac{\text{顶角能力}}{\text{球运动的力}}=\frac{ab}{bf}$$

推广一步，得

$$\frac{4\text{顶角受力的总和}}{\text{球运动的力}}=\frac{\text{正方形边长的总和}}{\text{圆半径}}$$

再推广到任意的规则多边形，得

$$\frac{\text{所有顶角冲击的总和}}{\text{球运动的力}}=\frac{\text{边长的总和}}{\text{圆半径}}$$

---

① J.Herivel,Background to Newton’s Principia,Oxford,1965.

于是他写道：“如果物体被无限多边的外接等边多边形的边（也即圆本身）反弹，所有反弹的力之比等于所有各边对半径之比。”

■图 1–4 牛顿分析圆周运动用图

用现代述语就是：离（向）心力对时间的积分与动量之比等于 2π。结果是正确的，但是含意模糊，没有直接求得离心力。这就是牛顿初次推导离心力的尝试。

2．接着，牛顿又通过圆周运动和单摆运动比较“离心力”和重力。

他用图 1–5 表示圆周运动和单摆运动。c 沿圆周 cgef 运动，b 沿摆长 ab=ad 的圆弧摆动，d 为圆 cgef 的中心，牛顿写出下列关系：

“ad：dc=重力：中心 d 施于 c 的力。”

3．在 1665 年另一份手稿上，牛顿写下了如下关系：“一个物体在等于某一圆周运动的离心力作用下沿直线运动，该圆周半径为 R，则当圆周运动走过距离为R时，物体沿直线走过的距离为$\frac{1}{2}$R。”

这个关系正是离心力公式的特殊形式，请看：

只要假设已知离心加速度为$\alpha=\frac{v^2}{R}$，则沿直线走过的距离为

$\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2}\cdot\frac{v^2}{R}(\frac{R}{v})^2=\frac{1}{2}R$ 与牛顿给出的结果一致，不过当时牛顿并没有给出导致上述关系的证明。

4．在 1669 年的手稿中，终于找到了牛顿推导离心力公式的方法，他采用图 1–6 并说明如下：

■图 1–6 牛顿推导离力心

“当沿圆周 AD，从物体 A 的中心朝向 D 的力具有如下大小：在相当于 AD 这段时间内，物体离开圆周有一段距离，这段距离相当于沿切线不受力自由行走的距离。

“假定这个力以重力方式沿直线作用，它就会使物体走过的距离与时间的平方成正比。为了求得在转一周 ADEA 的期间走过的距离，我们来找一线段，这个线段与 BD 之比正好等于周长 ADEA 的平方与 AD 的平方之比。”

牛顿在手稿中给出答案，这个距离“等于 19.7392 半径。”

我们可以作一简单计算：假设已知加速度为$a=\frac{v^2}{R}$，时间

$t=\frac{2\pi R}{v}$，则

$$d=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2}\cdot\frac{v^2}{R}\cdot(\frac{2\pi R}{v})^2=2\pi^2R,$$

正好等于 19.7392R，可见牛顿推证的关系就是 d=2π²R。

[①] 圆周运动走过距离 R 的时间应为

以上的资料说明了什么呢？

(1)证实牛顿在 1665 年已经掌握离心力公式，因此他从圆周运动推出平方反比关系是完全可能的；

(2)但是他推导离心力的思路非常独特，他根据的是笛卡儿的碰撞理论和伽利略的时间平方关系，加上他自己高明的数学才能，得到的是物理意义含混不清的数学关系，可见，他当时没有明确圆周运动的力学特征；

(3)牛顿当时还没有认识到引力的普遍性。

1.4.3　牛顿再次研究天体问题

1679 年，这时牛顿已经将力学问题搁置了十几年，在这期间，他创立了微积分，这一数学工具使他有可能更深入地探讨力学问题。

这年年底，牛顿意外地收到了胡克的一封来信，询问地球表面上落体的路径，牛顿在回信中错误地把这个轨迹看成是终止于地心的螺旋线。经胡克指出，牛顿承认了错误。但在回答胡克第二封信时又出了错，他推证了一种轨道，是在重力等于常数的情况下作出的。胡克于是再次复信，指出错误，说他自己认为重力是按距离的平方成反比变化的。这些信成了后来胡克争辩发现权的依据。牛顿则认为自己早已从开普勒第三定律推出了平方反比关系，认为胡克在信中提出的见解缺乏坚实的基础，所以一直拒绝承认胡克的功绩。

其实，胡克的提示对牛顿是重要的，胡克第一个正确地论述了圆周运动，建立了完整的概念。他把圆周运动看成是不平衡状态，认为有某种力持续地作用于作圆周运动的物体，破坏它的直线运动，使之保持闭合路径。1679—1680 年间的通信对牛顿有深刻教益，以后他就采用惠更斯的“向心力”一词，并在 1680 年证明椭圆轨道中的物体必受一指向焦点的力，这个力与距焦点的距离的平方成反比。这一工作后来成了《原理》一书的奠基石之一。

椭圆轨道的平方反比定律和万有引力定律还不是一回事。到这个时候，牛顿仍没有认识到万有引力。有一事例可资证明：1680 年 11 月有一颗大彗星拂晓前出现在东方天空，朝太阳方向运动，直至消失；两个星期后，又有一颗大彗星在日落后出现在西方天空，远离太阳而去。英国皇家天文学家佛兰斯特(J. Flamsteed)坚持说，这两颗彗星其实是同一颗，在太阳近旁方向大约改变了 180°。不过他是用一种幻想式的物理学来处理这个问题，把太阳和彗星之间的作用看成是磁极之间的磁力，说先是太阳吸引彗星的一极，而后又排斥另一极。牛顿对那些彗星也观察得非常细致，亲自作了观测记录。有趣的是，他竟主张这是两颗不同的彗星。于是在牛顿和佛兰斯特之间进行了多次通信，这些信件说明牛顿还没有树立万有引力的观念，因此没有把自己的理论应用到彗星上去。他那时也和其他物理学家一样，把平方反比定律看成是只有太阳系才遵

守，而彗星不属于太阳系，也就不受这一定律的管辖。

1.4.4 《原理》的三步曲

由于惠更斯在 1673 年提出了离心力公式，不止一个人先后从开普勒第三定律推出了平方反比定律，其中有哈雷（EdmondHal-ley）和雷恩（ChristopherWren）。在一次聚会中，哈雷、雷恩和胡克谈论到在平方反比的力场中物体的轨迹形状。当时胡克曾声称，可以用平方反比关系证明一切天体的运动规律，雷恩怀疑胡克的说法，提出如果有谁能在 2 个月给出证明，他愿出 40 先令作为奖励。胡克坚持说他确能证明，只是不愿先公布，为的是想看看有谁能解决，到那时再与之较量。

于是哈雷就在 1684 年 8 月专程去剑桥访问了牛顿，向牛顿征询关于平方反比定律的轨迹问题，对此牛顿立刻回答说：轨迹应是椭圆。哈雷问他：您怎样知道的？牛顿答：我作过计算。哈雷希望看到计算内容，牛顿怕再象上次那样出错，就故意假装找不到。不过，他还是按哈雷的要求重新作了计算，并将证明寄给了哈雷。于是，哈雷不久就收到了牛顿的一篇 9 页长的论文。这篇论文没有题目，人们通常称之为《论运动》(De motu)。这就是《原理》一书的前身，也可以说是它的第一阶段。牛顿在这篇论文中讨论了在中心吸引力的作用下物体运动轨迹的理论，由此导出了开普勒的三个定律。但是还有两个关键问题没有解决，一个是对惯性定律的认识，牛顿在《论运动》一文中，仍然停留在固有力(inherent force)和强迫力(impressed force)这样两个基本概念上。物体内部的“固有力”，使物体维持原来的运动状态，作匀速直线运动，而外加的强迫力则使物体改变运动状态。他甚至还用平行四边形法则把这两个力合成一个力，并认为整个动力学就建立在这两个力的相互作用上。这说明牛顿的理论中还包括有错误的概念。一个“力”以 mv 量度，一个力以 ma 量度，它们怎样能合成为一个力？这是与惯性定律背道而驰的。

第二个问题是吸引的本质，在《论运动》一文中，牛顿仍称吸力为重力，没有认识到吸力的普遍性，更找不到万有引力的名称。

然而牛顿并没有就此止步。在他交出《论运动》一文之际，更深入的思考使他着手写第二篇论文，这一篇比前一篇文章长 10 倍，由两部分组成，取名为《论物体的运动》(De motucorporum)，他用了八九个月写成，并作为讲义交给剑桥大学图书馆，这是《原理》的第二阶段。牛顿在这篇论文中解决了惯性问题，他承认圆周运动是一匀加速运动，与匀加速直线运动是对应的；有了惯性定律，其它问题就迎刃而解。另一个主要进展是对引力的认识。在《论物体的运动》中，他证明了均匀球体吸引球外每个物体，吸引力都与球的质量直接成正比，与从球心的距离的平方成反比，提出可以把均匀球体看成是质量集中在球心；吸引力是相互的；并且通过三体问题的运算，证明开普勒定律的正确性。他把

重力扩展到行星运动，明确了引力的普遍性。

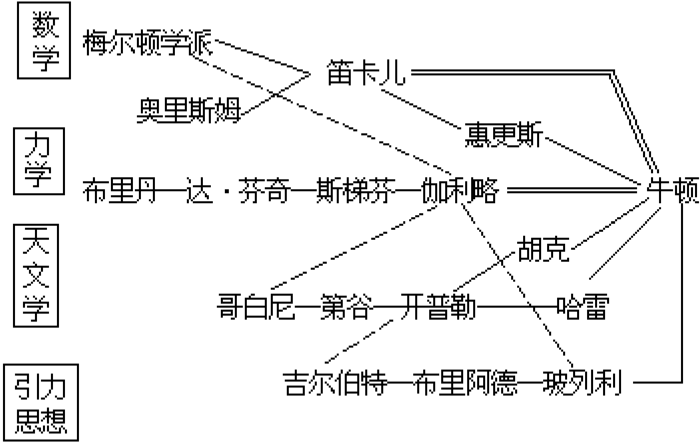
《论物体的运动》第二部分，后来以附录的形式收集在《原理》一书中，题名《论世界体系》，在里面突出地阐述了万有引力的思想，他用一张图（如图1－7）说明了行星在向心力的作用下为什么保持轨道运行，并比较了抛体运动和星球运动，他写道①“由于向心力行星会保持于某一轨道，如果我们考虑抛体运动，这一点就很容易理解：一块石头投出，由于自身重量的压力，被迫离开直线路径，如果单有初始投掷，理应按直线运动，而这时却在空气中描出了曲线，最终落在地面；投掷的速度越大，它在落地前走得越远。于是我们可以假设当速度增到如此之大，在落地前描出一条1、2、5、10、100、1000英里长的弧线，直到最后超出了地球的限度，进入空间永不触及地球。”

这一思想在1687年出版的《原理》提得更为明确，牛顿终于领悟了万有引力的真谛，把地面上的力学和天上的力学统一在一起，形成了以三大运动定律为基础的力学体系。

■ 图1–7 牛顿的抛体运动图

1.4.5 牛顿站在巨人的肩上

牛顿一封给胡克的信中写道[①]：“如果我看得更远那是因为站在巨人的肩上。”他这里指的是胡克和笛卡儿，当然不言而喻也包括了他多次提到的伽利略、开普勒和哥白尼。其实他完成的综合工作是基于从中世纪以来世世代代从事科学研究的前人的累累成果，我们可以列一个表来说明牛顿和前人的关系：



牛顿善于继承前人的成果，这是和他的奋发好学、勤于思考分不开的。有人问牛顿是怎样发现万有引力定律的，他回答说：“靠不停的思考(Bythinkingonitcontinually)。”[①]他思考时达到了废寝忘食的地步。

[①] A．Koyrè，NewtonianStudies，Harvard，1965，ch．3．

[①] R．S．Westfall，Newton’sDevelopmentofthePrincipiainR．Arisetal．(eds.)，SpringsofScientificCreativity，UniversityofMinnesotaPress，1983，p．41．

据回忆，当年他住在剑桥大学三一学院大门口附近。在哈雷访问过他之后的数月里，他这个怪人引起很多人的惊异。例如：他想去大厅吃饭，却转错了弯，走到大街上，忘了为什么要出来，于是又返回居室；在大厅里蓬头散发，衣着不整，坐在那里走神，菜饭放在桌前，也不知道吃。学院同事往往在校园散步时看到砂砾地面上有奇怪图形，谁也不懂，绕道而行。牛顿在全身心地思考天体问题。

也许有人认为牛顿是幸运的，他所处的时代，“满地”都有珍宝可拾，到处都是未开发的处女地，和我们现在不一样。但是，我们要学的是他的精神，切不可以把他当圣人，以为他是单凭灵感和天才做出丰功伟绩来的。他追求真理的征途还未完结，也永远不会完结。请读他的遗言[①]：

“我不知道世人对我是怎样看法，但是在我看来，我不过象一个在海滨玩耍的孩子，为时而发现一块比平常光滑的石子或美丽的贝壳而感到高兴；但那浩瀚的真理之海洋，却还在我的面前未曾发现呢？”

§1.5 碰撞的研究

碰撞现象是物体间相互作用最直接的一种形式，在力学体系的形成过程中，碰撞问题的研究是重要课题之一，它为力学的基本定律提供了有力的依据。

1.5.1 早期的研究

早在伽利略写作《两门新科学》的时候，他就打算用数学方法论述碰撞问题，并计划作为第 6 天对话收入该书中，后因赶不上出版时间就搁下了。不过这方面的手稿《碰撞的力》还是在 1718 年由后人整理发表。在这部手稿中，可以看到伽利略尝试找到碰撞的规律，但没有取得成功。例如，他描述过图 1—8 所示的实验。取一盛水的容器Ⅰ，底部开有带塞的小孔，下面挂着第二个容器Ⅱ，整个装置吊在平衡秤的一端，另一端是砝码。打开容器Ⅰ的孔塞，水喷射进容器Ⅱ。于是，容器Ⅰ损失了一部分压力，而容器Ⅱ受到一冲击力。伽利略原来希望通过改变平衡砝码的数值来测量冲击力，以便跟重力比较，可是使他惊奇的是，秤并没有偏向一方。他当时无法作出恰当解释。看来，他的困难主要是因为没有摆脱重力，把问题搞得过于复杂了。

■图 1–8 伽利略的碰撞实验

另外有一位物理学家叫马尔西(MarcusMarci，1595—1667)，布拉格大学校长，在 1639 年发表了他研究碰撞问题的一些成果。书名是《运动的比例》(DeProportionemotu)。在书中有一幅很生动的插图，如图 1–9：

[①] R.S.Westfall,Never atRest Cambridge, 1980,p.863.

一大理石球对心撞击一排大小相等的大理石球，运动传递给最后一球，中间一点不受影响。他的结论是：一个物体与另一大小相同处于静止状况的物体作弹性碰撞，就会失去自己的运动，而把速度等量地交给另一物体。不过他没有作出理论分析。

1.5.2　笛卡儿的碰撞理论

最早建立碰撞理论的是笛卡儿，他是一位著名的哲学家，也是一位数学家。物理学的研究虽不太多，但他从哲学上给物理学开辟道路，对当时和后来的物理学有过深远影响。笛卡儿主张整个世界是物质的，各种自然现象都可用力学通过数学演绎作出解释。

■图 1–9 马尔西的碰撞示意图

1644 年，笛卡儿在他的《哲学原理》一书中系统地发挥了这一思想。尽管他错误地把自然规律归之于“上帝”的安排，但运动量守恒的思想却有极为重要的意义，他写道[①]：

“在我看来，显然是上帝而不是别的什么，以其万能的威力创造物质时就赋予其各部分以运动或静止，也就是他，以后又按其惯常的方式将各部分初始的运动量和静止状态保存在宇宙之中。因为运动固然只是被推动的物质的一种状态，然而，总的看来却是一个永不增减的量；虽然某一部分的运动量会时多时少。”

接着，笛卡儿提出了运动量的定义：

“当一部分物质以两倍于另一部分物质的速度运动，而另一部分物质却大于这一部分物质的两倍时，我们有理由认为这两部分的物质具有相等的运动量，并且认为每当一部分的运动减少时，另一部分的运动就会相应地增加。”

显然，笛卡儿在这里肯定了运动量就是物质的量和速度的乘积，不过他那时还没有建立“质量”的概念，也就没法用数学写出动量的表达式。

在这本书中，笛卡儿还总结了七条碰撞规律，但是由于他不了解动量的矢量性，又没有具体分析弹性碰撞和非弹性碰撞的区别，七条规律中只有两条是正确的，即：

(1)两个以上大小相等，方向相反的速度碰撞的同样的物体，在碰撞后交换速度。

(2)如果物体 A 大于物体 B，且 B 静止，则无论 A 的速度多么小，都将推动 B 沿着自己运动的方向以同样的速度运动，其中物体 A 将把与物体 B 相应的部分运动传给 B。

如果笛卡儿能把实验当作检验理论的依据而认真追查原因，也许他有可能纠正自己的错误，可惜他没有认识到这一点。由于他的学术在当

[①] R．Dugas，AHistoryofMechanics，Routledge＆KeganPaul，1955， p．161．

时享有盛名，因此，他的模糊论点引起人们对碰撞理论的关注。

1.5.3 英国皇家学会的征文活动

鉴于碰撞的研究是力学的基本问题之一，1668 年英国的皇家学会决定发动科学界人士从实验和理论上搞清这个现象的规律，为此悬赏征文。有三人应征，系统地总结了他们各自独立进行的工作。最先提出论文的是瓦利斯（JohnWallis），他讨论非弹性物体的碰撞。他认为碰撞中起决定作用的是动量，在碰撞前后动量的总和应保持不变。另两位讨论的是弹性碰撞，一位是雷恩，一位是惠更斯。雷恩提出弹性碰撞的特殊规律，即当两物体速度大小与质量成反比时，碰撞后各以原来的速度弹回，他还由此找出了求末速度的一般公式，不过雷恩只是从实验得到经验公式，没有进一步作出理论证明。

1.5.4 惠更斯的碰撞理论

惠更斯是荷兰物理学家，在数学和天文学方面也有很高造诣，1629 年生于海牙，1655 年获法学博士，由于在数学上有许多创造发现而闻名于世，1656 年发明摆钟，1663 年成了英国皇家学会的第一位外国会员，后来还当了法国科学院院士，在国际上享有盛名。

惠更斯从 1652 年开始研究弹性物体之间的碰撞,1656 年把自己的结果收集在论文《论碰撞作用下物体的运动》(De motucorporum expercussione)中。当时没有发表，直到 1703 年他去世后，才被人整理发表。他的兴趣是由笛卡儿的著作引起的，但是他不完全同意笛卡儿的论点。1668 年英国皇家学会的征文活动，又重新激起了他对碰撞问题的兴趣。他提出的论文虽然比瓦利斯和雷恩晚，但却是唯一给出了理论证明的。

他提出了三个假设[①]：

第一个是惯性原理，“任何运动物体只要不遇障碍，将沿直线以同一速度运动下去。”

第二个假设是：“两个相同的物体作对心碰撞时，如碰前各自具有相等相反的速度，则将以同样的速度反向弹回”。

第三个假设肯定了运动相对性。“‘物体的运动’和‘速度的异同’这两个说法，只是相对于另一被看成是静止的物体而言。尽管所有物体都在共同的运动之中，当两物体碰撞时，这一共同运动就像不存在一样。”

由这三条假设，惠更斯推导出许多结论。

例如，他举了一个在船上进行碰撞实验的例子，他想象有一个人站在速度为 u 的船上，手中吊着两个球。两球分别以速度 v 从相反方向作对心碰撞。根据第三个假设，船上的人所看到的是两球分别以 V 反弹，

[①] R．Dugas， A History of Mechanics，Routledge＆Kegan Paul，1955，p．176．

但从岸上看来，却是更复杂的情况，两球以速度(v+u)和(v–u)相撞，又以(v–u)和(v+u)反弹。于是，惠更斯得出结论：两个相同的球以不同的速度作对心碰撞，彼此将会交换速度。

■图 1–10 惠更斯论碰撞作用下物体的运动

惠更斯对质量还没有形成明确的概念（那是牛顿在《原理》中解决的问题），他采用“大的程度”来代表惯性的大小，实际上就是后来的“质量”，它和速度的乘积就是动量。惠更斯证明笛卡儿所谓的总动量在碰撞过程中并不总是守恒的，而是“大的程度”（即质量）与速度平方的乘积应保持守恒。这就为后来莱布尼兹的活力守恒奠定了基础。

1.5.5　碰撞的实验研究

1673 年，马略特(E.Mariotte)创立了一种用单摆进行碰撞实验的方法。他用线把两个物体吊在同一水平面下，把它们当作摆锤，摆锤在最低点的速度与摆的起点高度有关，可从单摆下落时走过的弧来量度，而摆锤能够升起的高度，则决定于在最低点碰撞后所获得的速度。这样，马略特就找到了一种巧妙的方法，可以测出碰撞前后的瞬时速度。

这个实验牛顿也做过，他还用了修正空气阻力影响的实验方法，在《自然哲学的数学原理》一书中作了详细说明，他写道[①]：

■图 1–11 马略特用单摆做的碰撞实验

“我尝试用这个方法进行实验，摆长取 10 英尺，物体有时相同，有时不同。令物体从很大的距离，例如 8、12 或 16 英尺处下荡，以相反的方向相遇，结果是双方在运动中产生同等的变化，即作用和反作用恒等，所差不超过 3 英寸。例如物体 A 以 9 份运动撞到静止的物体 B，损失掉 7 份，碰撞后以 2 份继续前进，则物体 B 将以 7 份运动反弹。如果两物体从反方向相撞，A 以 12 份运动，B 以 6 份运动，而如果 A 以 2 份后退，B 将以 8 份后退，双方各减 14 份……”

牛顿从碰撞现象的研究，进一步提出了第三定律，他在同一书中写道：

“每一个作用总是有一个相等的反作用和它相对抗；或者说，两物体彼此之间的相互作用永远相等，并且各自指向其对方。”

■图 1–12 牛顿研究碰撞的实验示意图

§1.6　牛顿的绝对时空观和马赫的批判

牛顿在《自然哲学的数学原理》一开头，就以极其精炼的语言提出一系列定义，为后面的运用奠定逻辑基础，其中有：“物理的量”、“运动的量”、“物质固有的力”（按：即惯性）、“外加的力”等等。接

[①] L．Newton，MathematicalPrinciplesofNaturalPhilosophyUniversity，ofCalifor- niaPress，1946，p．23．

着，又以公理的形式提出了三大运动定律，即惯性定律、运动定律和作用反作用定律。其中运动定律是这样叙述的[①]：

“定律 2．运动的改变和外加的力成正比，并且发生在外加力的那个直线方向上。”

正如前几节所述，牛顿这些概念和定律高度概括了前人的工作。

紧接着三个定律之后，牛顿提出了 6 个推论。推论 1 和推论 2 涉及力的合成和分解以及运动的叠加原理；推论 3 和推论 4，得出了动量守恒定律；推论 5 和推论 6，包括了伽利略相对性原理。这样，牛顿就把前人的各不相关的独立成果系统化，综合在一起，形成了有逻辑联系的整体。

在这个理论体系的框架中，有一些必不可少的基本要素。牛顿以注释的方式写在定义的后面，这就是他对空间、时间和运动的观点。

关于时间，他写道：

“绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而在均匀地、与任何外界事物无关地流逝着，它又可名为‘期间’；相对的、表观的和通常的时间，是期间的一种可感觉的、外部的或者是精确的，或者是变化着的量度，人们通常就用这种量度，如小时、日、月、年来代表真正的时间。”

关于空间，牛顿写道：

“绝对空间，就其本性而言，是与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的。相对空间是绝对空间的某一可动部分或其量度，是通过它对其他物体的位置而为我们的感觉所指示出来的，并且通常是把它当作不动的空间的。”

关于运动，牛顿写道：

“绝对运动是一个物体从某一绝对的处所向另一绝对处所的移动。”

“真正的、绝对的静止，是指这一物体在不动的空间的同一个部分继续保持不动。”

这就是牛顿的绝对时空观。牛顿引入绝对时间和绝对空间的概念是完全必要的，由此可以提供一个标准来判断宇宙万物所处的状态，究竟是处于静止、匀速运动还是加速运动，才能使“力学有明确的意义”，（爱因斯坦语）。

为了证明“绝对运动”的存在，牛顿举了水桶旋转的例子。他写道[①]：

“如果用长绳吊一水桶，让它旋转至绳扭紧，然后将水注入，水与桶都暂处于静止之中。再以另一力突然使桶沿反方向旋转，当绳子完全放松时，桶的运动还会维持一段时间；水的表面起初是平的，和桶开始

[①] I．Newton，MathematicalPrinciplesofNaturalPhilosophy，UniversityofCalifor- niaPress，1946，p．13．

[①] I.Newton，MathematicalPrinciplesofNaturalPhilosophy,UniversityofCalifor-nia Press, 1946,p. 10.

旋转时一样。但是后来，当桶逐渐把运动传递给水，使水也开始旋转。于是可以看到水渐渐地脱离其中心而沿桶壁上升形成凹状（我曾作过这一试验）。运动越快，水升得越高。直到最后，水与桶的转速一致，水面即呈相对静止。水的升高显示它脱离转轴的倾向，也显示了水的真正的、绝对的圆周运动。这个运动是可知的，并可从这一倾向测出，跟相对运动正好相反。在开始时，桶中水的相对运动最大，但并无离开转轴的倾向；水既不偏向边缘，也不升高，而是保持平面，所以它的圆周运动尚未真正开始。但是后来，相对运动减小时，水却趋于边缘，证明它有一种倾向要离开转轴。这一倾向表明水的真正的圆周运动在不断增大，直到它达到最大值，这时水就在桶中作相对静止。所以，这一倾向并不依赖于水相对于周围物体的任何移动，这类移动也无法定义真正的圆周运动。”

这就是著名的“水桶实验”。牛顿用这个例子雄辩地论证了“绝对运动”概念的合理性。

但是，绝对时间和绝对空间毕竟是人为的假设，经不起实践的检验和严密的审查。二百多年来，引起过不少人的怀疑和争议。到了19世纪末，奥地利物理学家马赫(ErnstMach，1838—1916)在他的《力学史评》中深刻地分析了牛顿力学的基本概念以及由其反映的机械自然观，作出了深入的批判。例如：马赫不同意把惯性看成是物体固有的性质，认为在一个孤立的空间里谈论物体的惯性是毫无意义的，提出惯性来源于宇宙间物质的相互作用。他针对牛顿的绝对时间和绝对空间，驳斥道[①]：

“我们不应该忘记，世界上的一切事物都是互相联系、互相依赖的，我们本身和我们所有的思想也是自然界的一部分。”“绝对时间是一种无用的形而上学概念”，“它既无实践价值，也无科学价值，没有一个人能提出证据说明他知晓有关绝对时间的任何东西。”马赫还指出，绝对运动的概念也是站不住脚的。他写道[②]：

“牛顿旋转水桶的实验只是告诉我们，水对桶壁的相对转动并不引起显著的离心力，而这离心力是由水对地球的质量和其他天体的相对转动所产生的。如果桶壁愈来愈厚，愈来愈重，最后达到好几海里厚时，那时就没有人能说这实验会得出什么样的结果。”

马赫问道：“能把水桶固定，让众恒星旋转，再来证明离心力的不存在吗？”“这样的实验是不可能的，这种想法也是没有意义的，因为这两种情况从直觉看来是不可区别的。所以我认为这两种情况实属一种，而牛顿的区分是荒谬的。”

---

① E．Mach，TheScienceofMechanics，OpenCourt，1919，pp．223—224．

② 同上，p．232．

③ 同上，p．543．

马赫的精辟论述批驳了流行二三百年的机械自然观，揭示了牛顿力学的局限性，在当时的科学界和思想界中产生了很大震动。爱因斯坦高度评价马赫的批判精神，把他称为“相对论的先驱。”在悼念马赫的文章中，爱因斯坦写道[④]：

“是恩斯特·马赫，在他的《力学史评》中冲击了这种教条式的信念，当我是一名学生的时候，这本书正是在这方面给了我深刻的影响。”

[④] 许良英等编译，爱因斯坦文集，第一卷，商务印书馆，1977 年，p．9．

第二章　热学基本定律的形成

§2.1　历史概述

热学发展史实际上就是热力学和统计物理学的发展史，可以划分为四个时期。

第一个时期，实质上是热学的早期史，开始于 17 世纪末直到 19 世纪中叶，这个时期积累了大量的实验和观察事实。关于热的本性展开了研究和争论，为热力学理论的建立作了准备，在 19 世纪前半叶出现的热机理论和热功相当原理已经包含了热力学的基本思想。

第二时期从 19 世纪中叶到 19 世纪 70 年代末。这个时期发展了唯象热力学和分子运动论。这些理论的诞生直接与热功相当原理有关。热功相当原理奠定了热力学第一定律的基础。它和卡诺理论结合，导致了热力学第二定律的形成。热功相当原理跟微粒说（唯动说）结合则导致了分子运动论的建立。而在这段时期内唯象热力学和分子运动论的发展还是彼此隔绝的。

第三时期内唯象热力学的概念和分子运动论的概念结合的结果，最终导致了统计热力学的产生。它开始于 19 世纪 70 年代末玻尔兹曼的经典工作，止于 20 世纪初。这时出现了吉布斯在统计力学方面的基础工作。

从 20 世纪 30 年代起，热力学和统计物理学进入了第四个时期，这个时期内出现了量子统计物理学和非平衡态理论，形成了现代理论物理学最重要的一个部门。

§2.2　热力学第一定律的建立

2.2.1　准备阶段

19 世纪 40 年代以前，自然科学的发展为能量转化与守恒原理奠定了基础。主要从以下几个方面作了准备。

1．力学方面的准备

机械能守恒是能量守恒定律在机械运动中的一个特殊情况。早在力学初步形成时就已有了能量守恒思想的萌芽。例如，伽利略研究斜面问题和摆的运动，斯梯芬(Stevin，1548—1620)研究杠杆原理，惠更斯研究完全弹性碰撞等都涉及能量守恒问题。17 世纪法国哲学家笛卡儿已经明确提出了运动不灭的思想。以后德国哲学家莱布尼兹(Leibniz，1646—1716)引进活力(Visviva)的概念，首先提出活力守恒原理，他认为用 mv^2 度量的活力在力学过程中是守恒的，宇宙间的“活力”的总和是守恒的。D．伯努利(DanielBernoulli，1700—1782)的流体运动方程实际上

就是流体运动中的机械能守恒定律。

永动机不可能实现的历史教训，从反面提供了能量守恒的例证，成为导致建立能量守恒原理的重要线索。

至 19 世纪 20 年代，力学的理论著作强调“功”的概念，把它定义成力对距离的积分，并澄清了它和“活力”概念之间的数学关系，提供了一种机械“能”的度量，这为能量转换建立了定量基础。1835 年哈密顿(W.R.Hamilton，1805—1865)发表了《论动力学的普遍方法》一文，提出了哈密顿原理。至此能量守恒定律及其应用已经成为力学中的基本内容。

2．化学、生物学方面的准备

法国的拉瓦锡(A.L.Lavoisier，1743—1794)和拉普拉斯(P.S.M.Laplace，1749—1827)曾经研究过一个重要的生理现象，他们证明豚鼠吃过食物后发出动物热与等量的食物直接经化学过程燃烧所发的热接近相等。德国化学家李比希(J.Liebig，1803—1873)的学生莫尔(F．Mohr，1806—1879)则进一步认为不同形式的“力”（即能量）都是机械“力”的表现，他写道：

“除了 54 种化学元素外，自然界还有一种动因，叫做力。力在适当的条件下可以表现为运动、化学亲和力、凝聚、电、光、热和磁，从这些运动形式中的每一种可以得出一切其余形式。”他明确地表述了运动不同形式的统一性和相互转化的可能性。

3．热学方面的准备

伦福德伯爵(CountRumford，原名本杰明·汤普森BenjaminThompson，1753—1814)在 18 世纪末，做了一系列摩擦生热的实验攻击热质说。他仔细观察了大炮膛孔时的现象，1798 年 1 月 25 日在皇家学会宣读他的文章[①]：

“最近我应约去慕尼黑兵工厂领导钻制大炮的工作。我发现，铜炮在钻了很短的一段时间后，就会产生大量的热；而被钻头从大炮上钻下来的铜屑更热（象我用实验所证实的，发现它们比沸水还要热）。”

伦福德分析这些热是由于摩擦产生的，他说：“……我们一定不能忘记……在这些实验中，由摩擦所生的热的来源似乎是无穷无尽的。”

伦福德的实验引起不小的反响。在他的影响下，有一位英国化学家戴维(HumphryDavy，1778—1829)，曾在 1799 年发表了《论热、光及光的复合》一文，介绍了他所做的冰块摩擦实验，这个实验为热功相当性提供了有说服力的实例，激励更多的人去探讨这个问题。

4．电磁学方面的准备

19 世纪二、三十年代，电磁学的基本规律陆续发现，人们自然对电

[①] W．F．Magie，ASourceBookinPhysics，McGrawHill，1935，p．151．

与磁、电与热、电与化学等关系密切注视。法拉第(MichaelFaraday，1791—1867)尤其强调各种“自然力”的统一和转化，他认为“自然力”的转变，是其不灭性的结果。“自然力”不能从无生有，一种“力”的产生是另一种“力”消耗的结果。法拉第的许多工作都涉及转化现象，如电磁感应、电化学和光的磁效应……等。他在 1845 年发表一篇讨论磁对光的作用的论文，表述了他对“力”的统一性和等价性的基本概念，他写道：

“物质的力所处的不同形式很明显有一个共同的起源，换句话说，是如此直接地联系着和互相依赖着，以至于可以互相转换，并在其行动中，力具有守恒性。”

“力”的转化这一概念使他做出重要的发现。

在电与热的关系上，1821 年塞贝克(Seebeck)发现的温差电现象是“自然力”互相转化的又一重要例证。后面还将提到焦耳(J.P.Joule，1818—1889)在 1840 年研究了电流的热效应，发现 i^2R 定律，这是能量转化的一个定量关系，对能量转化与守恒定律的建立有重要意义。

2.2.2 能量转化与守恒定律初步形成

19 世纪初，由于蒸汽机的进一步发展，迫切需要研究热和功的关系，对蒸汽机“出力”作出理论上的分析。所以热与机械功的相互转化得到了广泛的研究。

埃瓦特(PeterEwart，1767—1842)对煤的燃烧所产生的热量和由此提供的“机械动力”之间的关系作了研究，建立了定量联系。

丹麦工程师和物理学家柯尔丁(L.Colding，1815—1888)对热、功之间的关系也作过研究。他从事过摩擦生热的实验，1843 年丹麦皇家科学院对他的论文签署了如下的批语[①]“柯尔丁的这篇论文的主要思想是由于摩擦、阻力、压力等造成的机械作用的损失，引起了物体内部的如热、电以及类似的动作，它们皆与损失的力成正比。”

俄国的赫斯(G.H.Hess，1802—1850)在更早就从化学的研究得到了能量转化与守恒的思想。他原是瑞士人，3 岁时到俄国，当过医生，在彼得堡执教，他以热化学研究著称。

1836 年赫斯向彼得堡科学院报告：“经过连续的研究，我确信，不管用什么方式完成化合，由此发出的热总是恒定的，这个原理是如此之明显，以至于如果我不认为已经被证明，也可以不加思索就认为它是一条公理。”[②]

在以后的岁月里赫斯鉴于上述原理的巨大意义，从各方面进行了实

---

① 转引自Я.М.Гелькфер,ИсторияиМетодологияТермодинамикииСтатистическойфизики,ВысшаяШкола,1981,p.136.

② 转引自 Y．Elkana，TheDiscoveryoftheConservationofEnergy，Harvard，1974，p．119.

验验证，于 1840 年 3 月 27 日在一次科学院演讲中提出了一个普遍的表述[③]：“当组成任何一种化学化合物时，往往会同时放出热量，这热量不取决于化合是直接进行还是经过几道反应间接进行。”以后他把这条定律广泛应用于他的热化学研究中。

赫斯的这一发现第一次反映了热力学第一定律的基本原理；热和功的总量与过程途径无关，只决定于体系的始末状态。体现了系统的内能的基本性质——与过程无关。赫斯的定律不仅反映守恒的思想，也包括了“力”的转变思想。至此，能量转化与守恒定律已初步形成。

其实法国工程师萨迪·卡诺(SadiCarnot，1796—1832)早在 1830 年就已确立了功热相当的思想，他在笔记中写道：

“热不是别的什么东西，而是动力，或者可以说，它是改变了形式的运动，它是（物体中粒子的）一种运动（的形式）。当物体的粒子的动力消失时，必定同时有热产生，其量与粒子消失的动力精确地成正比。相反地，如果热损失了，必定有动力产生。”

“因此人们可以得出一个普遍命题：在自然界中存在的动力，在量上是不变的。准确地说，它既不会创生也不会消灭；实际上，它只改变了它的形式。”

卡诺未作推导而基本上正确地给出了热功当量的数值：370 千克米/千卡。由于卡诺过早地死去，他的弟弟虽看过他的遗稿，却不理解这一原理的意义，直到 1878 年，才公开发表了这部遗稿。这时，热力学第一定律早已建立了。

2.2.3 能量转化与守恒定律的确立

对能量转化与守恒定律作出明确叙述的，首先要提到三位科学家。他们是德国的迈尔(RobertMayer，1814—1878)、赫姆霍兹(Hermann von Helmholtz，1821—1894)和英国的焦耳。

1．迈尔的工作

迈尔是一位医生。在一次驶往印度尼西亚的航行中[①]，迈尔作为随船医生，在给生病的船员放血时，得到了重要启示，发现静脉血不象生活在温带国家中的人那样颜色暗淡，而是象动脉血那样新鲜。当地医生告诉他，这种现象在辽阔的热带地区是到处可见的。他还听到海员们说，暴风雨时海水比较热。这些现象引起了迈尔的沉思。他想到，食物中含有化学能，它象机械能一样可以转化为热。在热带高温情况下，机体只需要吸收食物中较少的热量，所以机体中食物的燃烧过程减弱了，因此静脉血中留下了较多的氧。他已认识到生物体内能量的输入和输出是平衡的。

[③] 同①

[①] 大约在 1840 年。

迈尔在 1842 年发表的题为《热的力学的几点说明》中，宣布了热和机械能的相当性和可转换性，他的推理如下[①]：

“力是原因：因此，我们可以全面运用这样一条原则来看待它们，即‘因等于果’。设因 c 有果 e，则 c=e；反之，设 e 为另一果 f 之因，则有 e=f 等等，c=e=f=…=c 在一串因果之中，某一项或某一项的某一部分绝不会化为乌有，这从方程式的性质就可明显看出。这是所有原因的第一个特性，我们称之为不灭性。”

接着迈尔用反证法，证明守恒性（不灭性）：

“如果给定的原因 c 产生了等于其自身的结果 e，则此行为必将停止；c 变为 e；若在产生 e 后，c 仍保留全部或一部分，则必有进一步的结果，相当于留下的原因 c 的全部结果将＞e，于是就将与前提 c=e 矛盾。”“相应的，由于 c 变为 e，e 变为 f 等等，我们必须把这些不同的值看成是同一客体出现时所呈的不同形式。这种呈现不同形式的能力是所有原因的第二种基本特性。把这两种特性放在一起我们可以说，原因（在量上）是不灭的，而（在质上）是可转化的客体。”

迈尔的结论是：“因此力（即能量）是不灭的、可转化的、不可秤量的客体。”

迈尔这种推论方法显然过于笼统，难以令人信服，但他关于能量转化与守恒的叙述是最早的完整表达。

迈尔在 1845 年发表了第二篇论文：《有机运动及其与新陈代谢的联系》，该文更系统地阐明能量的转化与守恒的思想。他明确指出：“无不能生有，有不能变无”，“在死的和活的自然界中，这个力（按：即能量）永远处于循环转化的过程之中。任何地方，没有一个过程不是力的形式变化！”他主张：“热是一种力，它可以转变为机械效应。”论文中还具体地论述了热和功的联系，推出了气体定压比热和定容比热之差 C_p-C_v 等于定压膨胀功 R 的关系式。现在我们称 $C_p-C_v=R$ 为迈尔公式。

接着迈尔又根据狄拉洛希(Delaroche)和贝拉尔德(Berard)以及杜隆(Dulong)气体比热的实验数据 C_p=0.267 卡/克·度、C_v=0.188 卡/克·度计算出热功。

计算过程如下：

在定压下使 1 厘米^{3}空气加热温升 1 度所需的热量为：$Q_p=mc_p\Delta$=0.000347 卡（取空气密度 ρ=0.0013 克/厘米^3）。相应地，在定容下加热同量空气温升 1 度消耗的热 Q_v=0.000244 卡。二者的热量差 Q_p-Q_v=0.000103 卡。另一方面，温度升高 1 度等压膨胀时体积增大为原体积的 1/274 倍；气体对外作的功，可以使 1.033 千克的水银柱升高 1/274 厘

---

① 转引自 HoltonandRoller，FoundationsofModernPhysicalScience，Addison-Wes- ley，1965，p．345．

米。即功 $= 1.033 \times \frac{1}{27400} = 3.78 \times 10^{-5}$ 千克·米。于是迈尔得出热功当量为

$$J = \frac{A}{Q_p - Q_v} = \frac{3.78 \times 10^{-5}}{1.03 \times 10^{-7}} = 367 \text{千克·米/千卡。}$$

或 3597 焦耳/千卡，现在的精确值为 4187 焦耳/千卡。

迈尔还具体地考察了另外几种不同形式的力。他以起电机为例说明了“机械效应向电的转化。”他认为：“下落的力”（即重力势能）可以用“重量和（下落）高度的乘积来量度。”“与下落的力转变为运动或者运动转变为下落的力无关，这个力或机械效应始终是不变的常量。”

迈尔第一个在科学史中将热力学观点用于研究有机世界中的现象，他考察了有机物的生命活动过程中的物理化学转变，确信“生命力”理论是荒诞无稽的。他证明生命过程无所谓“生命力”，而是一种化学过程，是由于吸收了氧和食物，转化为热。这样迈尔就将植物和动物的生命活动，从唯物主义的立场，看成是能的各种形式的转变。

1848 年迈尔发表了《天体力学》一书，书中解释陨石的发光是由于在大气中损失了动能。他还应用能量守恒原理解释了潮汐的涨落。

迈尔虽然第一个完整地提出了能量转化与守恒原理，但是在他的著作发表的几年内，不仅没有得到人们的重视，反而受到了一些著名物理学家的反对。由于他的思想不合当时流行的观念，还受到人们的诽谤和讥笑，使他在精神上受到很大刺激，曾一度关进精神病院，倍受折磨。

2．赫姆霍兹的研究

从多方面论证能量转化与守恒定律的是德国的海曼·赫姆霍兹。他曾在著名的生理学家缪勒(Johannes Müller)的实验室里工作过多年，研究过“动物热。”他深信所有的生命现象都必得服从物理与化学规律。他早年在数学上有过良好的训练，同时又很熟悉力学的成就，读过牛顿、达朗贝尔、拉格朗日等人的著作，对拉格朗日的分析力学有深刻印象。他的父亲是一位哲学教授，和著名哲学家费赫特(Fichte)是好朋友。海曼·赫姆霍兹接受了前辈的影响，成了康德哲学的信徒，把自然界大统一当作自己的信条。他认为如果自然界的“力”（即能量）是守恒的，则所有的“力”都应和机械“力”具有相同的量纲，并可还原为机械“力”。1847 年，26 岁的赫姆霍兹写成了著名论文《力的守恒》，充分论述了这一命题[①]。这篇论文是 1847 年 7 月 23 日在柏林物理学会会议上的报告，由于被认为是思辨性、缺乏实验研究成果的一般论文，没有在当时有国际声望的《物理学年鉴》上发表，而是以小册子的形式单独印行的。

但是历史证明，这篇论文在热力学的发展中占有重要地位，因为赫姆霍兹总结了许多人的工作，一举把能量概念从机械运动推广到了所有

[①] 转引自 Lindsay(ed.)ApplicationsofEnergyNineteenCentury，Dowden，1976．p．7．

变化过程，并证明了普遍的能量守恒原理。这是一个十分有力的理论武器，从而可以更深入地理解自然界的统一性。

赫姆霍兹在这篇论文一开头就声称，他的“论文的主要内容是面对物理学家，”他的目的是“建立基本原理，并由基本原理出发引出各种推论，再与物理学不同分支的各种经验进行比较。”

在他的论述中有一明显的趋向，就是企图把一切自然过程都归结于中心力的作用。我们都知道，在只有中心力的作用下，能量守恒是正确的，但是这只是能量守恒原理的一个特例，把中心力看成是普遍能量守恒的条件就不正确了。

他的论文共分六节，前两节主要是回顾力学的发展，强调了活力守恒（即动能守恒），进而分析了“力”的守恒原理（即机械能守恒原理）；第三节涉及守恒原理的各种应用；第四节题为“热的力当量性，”他明确地摒弃了热质说，把热看成粒子（分子或原子）运动能量的一种形式。第五节“电过程的力相当性”和第六节“磁和电磁现象的力相当性”讨论各种电磁现象和电化学过程，特别是电池中的热现象对能量转化关系进行了详细研究。文章最后提到能量概念也有可能应用于有机体的生命过程，他的论点和迈尔接近。不过，看来他当时并不知道迈尔的工作。

赫姆霍兹在结束语中写道：“通过上面的叙述已经证明了我们所讨论的定律没有和任何一个迄今所知的自然科学事实相矛盾，反而却引人注目地为大多数事实所证实。……这定律的完全验证，也许必须看成是物理学最近将来的主要课题之一。”

实际上，实验验证这一定律的工作早在赫姆霍兹论文之前就已经开始了。焦耳在这方面做出了巨大贡献。

3．焦耳的实验研究

焦耳是英国著名实验物理学家。1818 年他出生于英国曼彻斯特市近郊，是富有的酿酒厂主的儿子。他从小在家由家庭教师教授， 16 岁起与其兄弟一起到著名化学家道尔顿(JohnDalton，1766—1844)那里学习，这在焦耳的一生中起了关键的指导作用，使他对科学发生了浓厚的兴趣，后来他就在家里做起了各种实验，成为一名业余科学家。

这时正值电磁力和电磁感应现象发现不久，电机——当时叫磁电机(electric-magnetic engine)——刚刚出现，人们还不大了解电磁现象的内在规律，也缺乏对电路的深刻认识，只是感到磁电机非常新奇，有可能代替蒸汽机成为效率更高、管理方便的新动力，于是一股电气热潮席卷了欧洲，甚至波及美国。焦耳当时刚 20 岁，正处于敏感的年龄，家中又有很好的实验条件（估计他父亲厂里有蒸汽机），对革新动力设备很感兴趣，就投入到电气热潮之中，开始研究起磁电机来。

从 1838 年到 1842 年的几年中，焦耳一共写了八篇有关电机的通讯和论文，以及一篇关于电池、三篇关于电磁铁的论文。他通过磁电机的

各种试验注意到电机和电路中的发热现象，他认为这和机件运转中的摩擦现象一样，都是动力损失的根源。于是他就开始进行电流的热效应的研究。

1841 年他在《哲学杂志》上发表文章《电的金属导体产生的热和电解时电池组中的热》，叙述了他的实验：为了确定金属导线的热功率，让导线穿过一根玻璃管，再将它密缠在管上，每圈之间留有空隙，线圈终端分开。然后将玻璃管放入盛水的容器中，通电后用温度计测量水产生的温度变化。实验时，他先用不同尺寸的导线，继而又改变电流的强度，结果判定“在一定时间内伏打电流通过金属导体产生的热与电流强度的平方及导体电阻的乘积成正比。”这就是著名的焦耳定律，又称 i^2R 定律。

随后，他又以电解质做了大量实验，证明上述结论依然正确。

i^2R 定律的发现使焦耳对电路中电流的作用有了明确的认识。他仿照动物体中血液的循环，把电池比作心肺，把电流比作血液，指出：“电可以看成是携带、安排和转变化学热的一种重要媒介”，并且认为，在电池中“燃烧”一定量的化学“燃料”，在电路中（包括电池本身）就会发出相应大小的热，和这些燃料在氧气中点火直接燃烧所得应是一样多。请注意，这时焦耳已经用上了“转变化学热”一词，说明他已建立了能量转化的普遍概念，他对热、化学作用和电的等价性已有了明确的认识。

然而，这种等价性的最有力证据，莫过于热功当量的直接实验数据。正是由于探索磁电机中热的损耗，促使焦耳进行了大量的热功当量实验。1843 年焦耳在《磁电的热效应和热的机械值》一文中叙述了他的目的，写道：

“我相信理所当然的是：磁电机的电力与其它来源产生的电流一样，在整个电路中具有同样的热性质。当然，如果我们认为热不是物质，而是一种振动状态，就似乎没有理由认为它不能由一种简单的机械性质的作用所引起，例如象线圈在永久磁铁的两极间旋转的那种作用。与此同时，也必须承认，迄今尚未有实验能对这个非常有趣的问题作出判决，因为所有这些实验都只限于电路的局部，这就留下了疑问，究竟热是生成的，还是从感应出磁电流的线圈里转移出来的？如果热是线圈里转移出来的，线圈本身就要变冷。……所以，我决定致力于清除磁电热的不确定性。”

焦耳把磁电机放在作为量热器的水桶里，旋转磁电机，并将线圈的电流引到电流计中进行测量，同时测量水桶的水温变化。实验表明，磁电机线圈产生的热也与电流的平方成正比。

焦耳又把磁电机作为负载接入电路，电路中另接一电池，以观察磁电机内部热的生成，这时，磁电机仍放在作为量热器的水桶里，焦耳继

续写道："我将轮子转向一方，就可使磁电机与电流反向而接，转向另一方，可以借磁电机增大电流。前一情况，仪器具有磁电机的所有特性，后一情况适得其反，它消耗了机械力。"

比较磁电机正反接入电路的实验，焦耳得出结论："我们从磁电得到了一种媒介，用它可以凭借简单的机械方法，破坏热或产生热。"

至此，焦耳已经从磁电机这个具体问题的研究中领悟到了一个具有普遍意义的规律，这就是热和机械功可以互相转化，在转化过程中一定有当量关系。他写道[①]：

"在证明了热可以用磁电机生成，用磁的感应力可以随意增减由于化学变化产生的热之后，探求热和得到的或失去的机械功之间是否存在一个恒定的比值，就成了十分有趣的课题。为此目的，只需要重复以前的一些实验并同时确定转动仪器所需的机械力。"

焦耳在磁电机线圈的转轴上绕两条细线，相距约 27.4 米处置两个定滑轮，跨过滑轮挂有砝码，砝码约几磅重（1 磅=0.45359 千克），可随意调整。线圈浸在量热器的水中，从温度计的读数变化可算出热量，从砝码的重量及下落的距离可算出机械功。在 1843 年的论文中，焦耳根据 13 组实验数据取平均值得如下结果：

"能使 1 磅的水温度升温华氏一度的热量等于（可转化为）把 838 磅重物提升 1 英尺的机械功。"

838 磅·英尺相当于 1135 焦耳，这里得到的热功当量 838 磅·英尺/英热单位等于 4.511 焦耳/卡（现代公认值为 4.187 焦耳/卡）。

焦耳并没有忘记测定热功当量的实际意义，就在这篇论文中他指出，最重要的实际意义有两点：(1) 可用于研究蒸汽机的出力；(2)可用于研究磁电机作为经济的动力的可行性。可见，焦耳研究这个问题始终没有离开他原先的目标。

焦耳还用多孔塞置于水的通道中，测量水通过多孔塞后的温升，得到热功当量为 770 磅·英尺/英热单位（4.145 焦耳/卡。）这是焦耳得到的与现代热功当量值最接近的数值。

■图 2–1 桨叶搅拌实验

1845 年，焦耳报道他在量热器中安装一带桨叶的转轮，如图 2–1，经滑轮吊两重物下滑，桨轮旋转，不断搅动水使水升温，测得热功当量为 890 磅·英尺/英热单位，相当于 4.782 焦耳/卡。

■图 2–2 空气压缩实验

同年，焦耳写了论文《空气的稀释和浓缩所引起的温度变化》，记述了如下实验：把一个带有容器 R 的压气机 C 放在作为量热器的水桶 A 中，如图 2–2。压气机把经过干燥器 G 和蛇形管 W 的空气压缩到容器 R

[①] TheScientificPapersofJ.P.Joule,vol.1,Tayler,1884,p.149.

中，然后测量空气在压缩后的温升，从温升可算出热量。气压从一个大气压变为 22 个大气压，压缩过程视为绝热过程，可计算压气机作的功。由此得到热功当量为 823 及 795 磅 · 英尺/英热单位。然后，经蛇形管释放压缩空气（图 2–3），量热器温度下降，又可算出热功当量为 820、814、760 磅 ·英尺/英热单位，从空气的压缩和膨胀得到的平均值为 798 磅 ·英尺/英热单位，相当于 4.312 焦耳/卡。

■图 2–3 空气稀释实验

1849 年 6 月，焦耳作了一个《热功当量》的总结报告，全面整理了他几年来用桨叶搅拌法和铸铁摩擦法测热功当量的实验，给出如下结果（单位均以磅 · 英尺/英热单位表示）[1]：

	空气中的当量值	真空中的当量值	平均
水	773.640	772.692	772.692
汞	773.762	772.814	774.083
汞	776.303	775.352	
铸铁	776.997	776.045	774.987
铸铁	774.888	773.930	

焦耳的实验结果处理得相当严密，在计算中甚至考虑到将重量还原为真空中的值。对上述结果，焦耳作了分析，认为铸铁摩擦时会有微粒磨损，要消耗一定的功以克服其内聚力，因此所得结果可能偏大。汞和铸铁在实验中不可避免会有振动，产生微弱的声音，也会使结果偏大。在这三种材料中，以水的比热最大，所以比较起来，应该是用水作实验最准确。因此，在他的论文结束时，取 772 作为最后结果，这相当于 4.154 焦耳/卡。对此，他概括出两点：

“ 第一，由物体，不论是固体或液体，摩擦产生的热量总是正比于消耗的力之量；

第二，使一磅水（在真空中称量，用于 55 ° –60 ° ）的温度升高 1 ° F，所需消耗的机械力相当于 772 磅下落 1 英尺。 ”

焦耳从 1843 年以磁电机为对象开始测量热功当量，直到 1878 年最后一次发表实验结果，先后做实验不下四百余次，采用了原理不同的各种方法，他以日益精确的数据，为热和功的相当性提供了可靠的证据，使能量转化与守恒定律确立在牢固的实验基础之上。

4．全面的表述

能量转化与守恒定律是自然界基本规律之一。恩格斯对这一规律的发现给予崇高的评价，把它和达尔文进化论及细胞学说并列为三大自然发现。能量转化与守恒定律这个全面的名称就是恩格斯首先提出来的。

完整的数学形式则是德国的克劳修斯（Rudoff Julius Emanuel

---

[1] TheScientificPapersofJ.P.Joule,vol.2,Taylor,1884,p.328.

Clausius，1822—1888）在 1850 年首先提出的，他全面分析了热量 Q、功 W 和气体状态的某一特定函数 u 之间的联系，考虑一无限小过程，列出全微分方程：dQ=du+AdW，他写道：“气体在一个关于温度和体积所发生的变化中所取得的热量 Q，可以划分为两部分，其中之一为 u，它包括添加的自由热和做内功所耗去的热（如果有内功发生的话），u 的性质和总热量一样，是 v 和 t 的一个函数值，因而根据其间发生变化的气体初态和终态就已经完全确定；另一部分则包括做外功所消耗的热，它除了和那两个极限状态有关外，还依赖于中间变化的全过程。”

这里的 u 后来人们称作内能，A 是功热当量，W 是外功。克劳修斯虽然没有用到能量一词，但实际上已经为热力学奠定了基石。

W.汤姆生（William Thomson，即开尔文，LordKelvin，1824—1907）在 1851 年更明确地把函数 u 称为物体所需要的机械能（mechanical energy），他把上式看成热功相当性的表示式，这样就全面阐明了能、功和热量之间的关系。

1852 年，W.汤姆生进一步用动态能和静态能来表示运动的能量和潜在的能量。1853 年兰金（W.J.M.Rankine，1820—1872）将其改为实际能和势能，他这样表述能量转化与守恒定律：“宇宙中所有能量，实际能和势能，它们的总和恒定不变。”

1867 年在 W.汤姆生和泰特（Tait）的《自然哲学论文》中将上述实际能改为动能，一直沿用至今。

§2.3 卡诺和热机效率的研究

热力学第二定律的发现与提高热机效率的研究有密切关系。蒸汽机虽然在 18 世纪就已发明，但它从初创到广泛应用，经历了漫长的年月，1765 年和 1782 年，瓦特两次改进蒸汽机的设计，使蒸汽机的应用得到了很大发展，但是效率仍不高。如何进一步提高机器的效率就成了当时工程师和科学家共同关心的问题。法国数学家和工程学家萨迪·卡诺的父亲拉札尔·卡诺（Lazre Nico—las Carnot， 1753—1823）率先研究了这类问题，在他的著作中讨论了各种机械的效率，隐讳地提出这样一个观念：设计低劣的机器往往有“丢失”或“浪费”。当时，在水力学中有一条卡诺原理，就是拉札尔·卡诺提出的，说的是效率最大的条件是传送动力时不出现振动和湍流，这实际上反映了能量守恒的普遍规律。他的研究对他的儿子有深刻影响。

1824 年萨迪·卡诺发表了著名论文《关于火的动力及适于发展这一动力的机器的思考》，提出了在热机理论中有重要地位的卡诺定理，这

个定理后来成了热力学第二定律的先导。他写道[①]：

“为了以最普遍的形式来考虑热产生运动的原理，就必须撇开任何的机构或任何特殊的工作物质来进行考虑，就必须不仅建立蒸汽机原理，而且要建立所有假想的热机的原理，不论在这种热机里用的是什么工作物质，也不论以什么方法来运转它们。”

卡诺取最普遍的形式进行研究的方法，充分体现了热力学的精髓。他撇开一切次要因素，径直选取一个理想循环，由此建立热量和其转移过程中所作功之间的理论联系。

他首先作了如下假设：“设想两个物体 A 与 B，各保持于恒温，A 的温度高于 B；两者不论取出热或获得热，均不引起温度变化，其作用就象是两个无限大的热质之库。我们称 A 为热源，称 B 为冷凝器。”如图 2–4。

然后他“设想有一种弹性流体，例如大气，封闭在装有活动隔板或活塞 cd 的圆柱形容器 abcd 中。

“1．将 A 与容器 abcd 中的空气或与容器之壁接触，假设此壁是热质的良导体。由于这一接触，空气得到与 A 相同的温度。cd 为活塞所处的位置。

■图 2–4 卡诺用的插图

“2．活塞逐渐上升，直至取得 ef 的位置。保持空气与 A 接触，因此在空气稀释的过程中温度保持恒定，物体 A 提供了保持恒温所需的热质。

“3．移开物体 A，空气不再与任何能够提供热质的物体接触，但活塞仍继续移动，从位置 ef 达到位置 gh，空气未获任何热质而稀释，它的温度下降了。假设下降到和物体 B 的温度相等，这时活塞停止运动，占有位置 gh。

“4．将空气与物体 B 接触，活塞压缩空气由位置 gh 回复到 cd。但由于仍与 B 接触，空气保持恒温，并将热质交给物体 B。

“5．移开物体 B，继续压缩空气。由于空气这时已被隔绝，温度上升。压缩一直继续到空气达到 A 的温度。活塞在此期间从位置 cd 到了位置 ik。

“6．空气再与 A 接触，活塞从位置 ik 回到位置 ef，温度保持不变。

“7．再重新进行(3)中的步骤，以后相继经 4、5、6、3、4、5、6、3、4、5……。”

卡诺选取的理想循环是由两个等温过程和两个绝热过程组成的；等温膨胀时吸热，等温压缩时放热，空气经过一个循环，可以对外作功。

卡诺由这个循环出发，提出了一个普遍的命题：“热的动力与用于实现动力的工作物质无关；动力的量唯一地取决于热质在其间转移的两

[①] 转引自 Lindsay(ed.)Energy：Historical Development of the Concept, Dowden, 1975, p. 231.

物体的温度。”

卡诺根据热质守恒的假设和永动机不可能实现的经验总结，经过逻辑推理，证明他的理想循环获得了最高的效率。他写道：“如果有任何一种使用热的方法，优于我们所使用的，即如有可能用任何一种过程，使热质比上述操作顺序产生更多的动力，那就有可能使动力的一部分转化于使热质从物体 B 送回到物体 A，即从冷凝器回到热源，于是就可以使状态复原，重新开始第一道操作及其后的步骤，这就不仅造成了永恒运动，甚至还可以无限地创造出动力而不消耗热质或任何其他工作物质。这样的创造与公认的思想，与力学定律以及与正常的物理学完全矛盾，因而是不可取的。所以由此可得结论：用蒸汽获得的最大动力也是用任何其他手段得到的最大动力。”

这就是卡诺定理的最初表述。用现代词汇来讲就是：热机必须工作在两个热源之间，热机的效率仅仅决定于两个热源的温度差，而与工作物质无关，在两个固定热源之间工作的所有热机，以可逆机效率最高。

不过，由于卡诺信奉热质说，他的结论包含有不正确的成份。例如：他将蒸汽机比拟为水轮机，热质比拟为流水，热质从高温流向低温，总量不变。他写道：“我们可以足够确切地把热的动力比之于瀑布。……瀑布的动力取决于其高度和液体的量；而热的动力则取决于所用热质的量以及热质的‘下落高度’，即交换热质的两物体之间的温度差。”

卡诺就这样把热质的转移和机械功联系了起来。由于他缺乏热功转化的思想，因此，对于热力学第二定律，“他差不多已经探究到问题的底蕴。阻碍他完全解决这个问题的，并不是事实材料的不足，而只是一个先入为主的错误理论。”（恩格斯：《自然辨证法》）

卡诺在 1832 年 6 月先得了猩红热和脑膜炎 8 月 24 日又患流行性霍乱去世，年仅 36 岁。上节所述的他遗留下的手稿表明他后来也转向了热的唯动说，并预言了热功之间的当量关系和热的分子运动论。可惜，手稿直至 1878 年才发表，因而对热学的发展没有起到应有的作用。

§2.4　W.汤姆生提出绝对温标

W.汤姆生生于爱尔兰，早年曾在著名法国实验物理学家勒尼奥（H.V.Regnault，1810—1878）的实验室里工作过。在法国，W.汤姆生第一次读到了克拉珀龙（B.P.E.Clapeyron，1799—1864）阐述卡诺热动力理论的文章，对卡诺理论的威力留有深刻的印象。首先引起汤姆生注意的，是可以通过卡诺的热机确定温度，因为卡诺机与工作物质无关，这样定出的温标比根据气体定律建立的温标有许多优越的地方。1848 年，汤姆生在题为：《基于卡诺的热动力理论和由勒尼奥观测结果计算

所得的一种温标》的论文中写道[1]：“按照卡诺所建立的热和动力之间的关系，热量和温度间隔是计算从热获得机械效果的表达中唯一需要的要素，既然我们已经有了独立测量热量的一个确定体系，我们就能够测量温度间隔，据此对绝对温度差作出估计。”

W.汤姆生还对这样的温标作了如下说明：“所有度数都有相同的值，即物体 A 在温度 T，有一单位热由物体 A 传到温度为（T–1）的物体 B，不论 T 值多大，都会给出同样大小的机械效果。这个温标应正确地称为绝对温标，因为它的特性与任何特殊物质的物理性质是完全无关的。”

W.汤姆生的这一思想早在克拉珀龙的文章中就已奠定了基础。克拉珀龙在 1834 年发表的《论热的动力》一文中，首先用数学形式表达卡诺循环中功与热的关系。取一无穷小的卡诺循环 abcd 如图 2–5。气体经过循环，从高温传到低温的热量可表为

$$dQ = (\frac{dQ}{dV} - \frac{p}{V}\frac{dQ}{dp})dV \qquad (2-1)$$

再计算温差为 dt 的卡诺循环 abcd 所作的功 dw。ab，cd 为等温过程，bc、da 两条曲线为绝热过程。因为变化是无穷小，可以认为循环组成了一个平行四边形，$bn = dp = R\frac{dt}{V}$，则

$$dW = dpdV = \frac{Rdt}{V}dV \qquad (2-2)$$

$(2-2)$、$(2-1)$两式相除得：$\frac{dW}{dQ} = \frac{Rdt}{V\frac{dQ}{dV} - p\frac{dQ}{dp}}$

这就是“单位热量从温度为 t 的物体传到温度为 t–dt 的物体所能得到的最大效果。”

■图 2–5 克拉珀龙用图

克拉珀龙认为：“已经确定，这一功量与传递热量的工作物质无关，所以对所有气体都是相同的，也与物体的质量没有关系，但没有证据表示它与温度无关，所以

$$V\frac{dQ}{dV} - p\frac{dQ}{dp}$$

一定等于一个对所有气体都相同的温度的函数。”他以 C 表示这个函数，令

$$C = \frac{1}{R}(V\frac{dQ}{dV} - p\frac{dQ}{dp})$$

于是得

$$\frac{dW}{dQ} = \frac{dt}{C(t)}$$

---

[1] W.Thomson,Mathematicaland Physical Papers,vol.1Cambridge, 1882,p.104.

1849 年，W.汤姆生在《卡诺的热动力理论的说明及由勒尼奥蒸汽实验推算的数据结果》一文中，进一步研究了这一函数，不过他采用的符号与克拉珀龙有所不同，用相当于 1/C 的量μ表示功与热量的关系，

$$\mu = \frac{Ep_0V_0}{V(\frac{dQ}{dV})} \qquad (2-3)$$

其中 E 为气体的膨胀系数。p_0，V_0 为初始状态的压强和体积。他称μ为卡诺系数。

W.汤姆生还在文中列出了根据勒尼奥的蒸汽实验数据计算出的从 0℃到 230℃各个不同温度下的μ值，证明确是相差无几的常数。于是就进一步利用μ表示卡诺循环的功和热。将(2–3)式写成：

$$dQ = \frac{Ep_0V_0}{\mu}\frac{dV}{V}$$

气体体积由 V 压缩至 V′，积分得：

$$Q = \frac{Ep_0V_0}{\mu}\ln\frac{V}{V'}$$

另一方面体积从 V→V+dV 所作的功

$$dW = pdV = p_0V_0(1+Et)\frac{dV}{V}$$

同样的压缩过程求得积分

$$W = p_0V_0(1+Et)\ln\frac{V}{V'}$$

所以得出热功当量

$$J = \frac{W}{Q} = \frac{\mu(1+Et)}{E}$$

由此得

$$\mu = \frac{JE}{1+Et} = J\left[\frac{1}{\frac{1}{E}+t}\right]$$

1854 年，W.汤姆生和焦耳联合发表了《运动中流体的热效应》一文，其中专门有一节题为：《根据热的机械作用建立的绝对温标》，他们定义绝对温度为

$$T \equiv J/\mu$$

可得：

$$T = t + \frac{1}{E}$$

如果取 E=0.003665，则 T=272.85+t

考虑到密度随压强增大的效应，他们得到的修正结果为：

T=273.3+t

这就是绝对温标和摄氏温标的关系。

绝对温标的建立对热力学的发展有重要意义。汤姆生的建议很快就被人们接受。1887 年，绝对温标得到了国际公认。

§2.5　热力学第二定律的建立

本来汤姆生有可能立即从卡诺定理引出热力学第二定律，但是由于他没有摆脱热质说的羁绊，错过了首先发现热力学第二定律的机会。

2.5.1　克劳修斯研究热力学第二定律

就在汤姆生感到困难之际，克劳修斯于 1850 年在《物理学与化学年鉴》上率先发表了《论热的动力及能由此推出的关于热本性的定律》，对卡诺定理作了详尽的分析，他对热功之间的转化关系有明确的认识。他证明，在卡诺循环中，“有两种过程同时发生，一些热量用去了，另一些热量从热体转到冷体，这两部分热量与所产生的功有确定的关系。”

他进一步论证：“如果我们现在假设有两种物质，其中一种能够比另一种在转移一定量的热量中产生更多的功，或者，其实是一回事，要产生一定量的功只需从 A 到 B 转移更少的热。那么，我们就可以交替应用这两种物质，用前一种物质通过上述过程来产生功，用另一种物质在相反的过程中消耗这些功。到过程的末尾，两个物体都回到它们的原始状态；而产生的功正好与耗去的功抵消。所以根据我们以前的理论，热量既不会增加，也不会减少。唯一的变化就是热的分布，由于从 B 到 A 要比从 A 到 B 转移更多的热，继续下去就会使全部的热从 B 转移到 A。交替重复这两个过程就有可能不必消耗力或产生任何其它变化而随意把任意多的热量从冷体转移到热体，而这是与热的其它关系不符的，因为热总是表现出要使温差平衡的趋势，所以总是从更热的物体传到更冷的物体。”

就这样，克劳修斯正确地把卡诺定理作了扬弃而改造成与热力学第一定律并列的热力学第二定律。

1854 年，克劳修斯发表《热的机械论中第二个基本理论的另一形式》，在这篇论文中他更明确地阐明[1]>：

“热永远不能从冷的物体传向热的物体，如果没有与之联系的、同时发生的其它的变化的话。关于两个不同温度的物体间热交换的种种已知事实证明了这一点；因为热处处都显示企图使温度的差别均衡之趋势，所以只能沿相反的方向，即从热的物体传向冷的物体。因此，不必再作解释，这一原理的正确性也是不证自明的。”他特别强调“没有……其它变化”这一点，并解释说，如果同时有沿相反方向并至少是等量的热转移，还是可能发生热量从冷的物体传到热的物体的。这就是沿用至今的关于热力学第二定律的克劳修斯表述。

2.5.2　W.汤姆生研究热力学第二定律

汤姆生于 1851 年连续在《爱丁堡皇家学会会刊》上发表了三篇论文，题目是《热的动力理论》。文中提出了两个命题，比克劳修斯 1850 年的论述更为明确</&MARK①/&MARK>：

“热的动力的全部理论是建立在分别由焦耳和卡诺与克劳修斯所提出的下列两个命题的基础之上。

“命题 I （焦耳）——不管用什么方法从纯粹的热源产生出或者以纯粹的热效应损失掉等量的机械效应，都会有等量的热消失或产生出来。

“命题 II （卡诺与克劳修斯）——如果有一台机器，当它逆向工作时，它的每一部分的物理的和机械的作用也全部逆向，则它从一定量的热产生的机械效应，和任何具有相同温度的热源与冷凝器的热动力机一样。”

然后，W.汤姆生为了证明命题 II，提出了一条公理：“利用无生命的物质机构，把物质的任何部分冷到比周围最冷的物体还要低的温度以产生机械效应，是不可能的。”

W.汤姆生还指出，克劳修斯在证明中所用的公理和他自己提出的公理是相通的。他写道：

“克劳修斯证明所依据的公理如下：一台不借助任何外界作用的自动机器，把热从一个物体传到另一个温度更高的物体，是不可能的。

“容易证明，尽管这一公理与我所用的公理在形式上有所不同，但它们是互为因果的。每个证明的推理都与卡诺原先给出的严格类似。”

W.汤姆生把热力学第二定律的研究引向了深入，然而他公正地写道：“我提出这些说法并无意于争优先权，因为首先发表用正确原理建立的命题的是克劳修斯，他去年（指 1850 年）5 月就发表了自己的证明。……我只要求补充这样一句：恰好在我知道克劳修斯宣布或证明了这个命题之前，我也给出了证明。”热力学第二定律的发现比热力学第一定律的发现晚几年，在第一定律没有出世以前，第二定律是无法降生的。

2.5.3　克劳修斯提出熵的概念

一般认为，克劳修斯在 1865 年提出了熵的概念，其实，早在 1854 年，即最初形成热力学第二定律之后不到四年，他在《热的机械论中第二个基本理论的另一形式》一文中提出了“变换的等价性”，用一个符号 N 表示变换，这个符号 N 就是熵 S 的前身。

克劳修斯特别注意到了不可逆性，这是热力学概念发展中的又一台阶。他将可逆循环和不可逆循环作了区别。然后又定义“温度 t 时功转变为热量 Q 的变换等价值”为 $Q\cdot f(t)$，其中 $f(t)$为温度 t 的一个函数，他还规定功转变为热和热从高温转移到低温为正的变换。他又定义 $f(t)=1/T$，T 为“温度的未知函数”。这样，变换的等价值为 Q/T。

克劳修斯用符号 N 代表一个循环中变换的总值，得：

$$N=\frac{Q_1}{T_1}+\frac{Q_2}{T_2}+\cdots=\sum\frac{Q}{T}$$

如果温度的变化是连续的，则$N=\int\frac{dQ}{T}$，于是，他找到了一种数学方法，来表达可逆循环过程。他做了如下证明：对于一个可逆循环过程，如果 N 是负值，就表示热从冷体无补偿地转移到热体，这已经证明不可能实现；如果 N 是正值，则可以逆运行得到 N 的负值，也同样是禁戒的，那么结果只能是 N=0。

于是克劳修斯提出了热力学第二定律的另一种表述形式，即：对于所有可逆循环过程：

$$\int\frac{dQ}{t}=0$$

对于不可逆过程，克劳修斯写道：“在一循环过程中所有变换的代数和只能是正数，”即 N＞0。他把这样的变换称为“非补偿的”变换。他提到有许多这样的变换，但本质上没有差别。例如：热传导、摩擦生热、电流经电阻生热，以及“所有那些情形，力在作机械功时，并不是克服相等的抵抗力，而是又产生了一个可察觉的外部运动，多多少少有一点速度，其活力后来都变成热。”他和以前的学者一样，仍限于有热伴生的不可逆过程，没有扩展到其它类型的不可逆过程。

当然克劳修斯在这里所说的变换的等价值 N 是不严格的，因为他未采用绝对温标，但 N 这个函数已经具备了熵的基本特性。

到了 1865 年，克劳修斯发表《热的动力理论的基本方程的几种方便形式》，文中他明确用 T 表示绝对温标。关于热力学第二定律，他写道[①]：

“另一个量是关于第二定律的，它包括在方程式：$\int\frac{dQ}{t}=0$中。这这就是说，如果每当物体的变化从任意一个初态开始，连续地经过任意的其它状态又回到初态时，积分$\int\frac{dQ}{T}=0$，则在积分里的式子$\frac{dQ}{T}$必是某一量的全微分，它只与物体目前出现的状态有关，而与物体到达这个状态的途径无关。我们用 S 来表示这个量，可以规定：

$$dS=\frac{dQ}{T},$$

或者，如果我们设想把这个方程按任何一个能使物体从选定的初态到达其目前的状态的可逆过程来积分，并把量 S 在初态具有的值记为 S_0，则：

$$S=S_0+\int\frac{dQ}{T}.\text{”}$$

“如果我们要对 S 找一个特殊的名称，我们可以象把对量 U 所说的称为

[①] 转引自 J.Kestin,(ed.),TheSecondLawofThermodynamics,Dowden,1976,p.185.

物体的热和功含量一样，对 S 也可以说是物体的转换含量。但我认为更好的是，把这个在科学上如此重要的量的名称取自古老的语言，并使它能用于所有新语言之中，那末我建议根据希腊字ητροπη，即转变一字，把量 S 称为物体的 Entropie（即熵），我故意把字 Entropie 构造得尽可能与字 Energie（能）相似，因为这两个量在物理意义上彼此如此接近，在名称上有相同性，我认为是恰当的。”

2.5.4 宇宙“热寂说”

热力学第二定律和热力学第一定律一起，组成了热力学的理论基础，使热力学建立了完整的理论体系，成为物理学的重要组成部分。但是汤姆生和克劳修斯等错误地把热力学第二定律推广到整个宇宙，得出了宇宙“热寂”的荒谬结论。

W．汤姆生在 1852 年发表过一篇题为《自然界中机械能耗散的一般趋势》的论文，在论述两个基本定律的同时，对物质世界的总趋势作了如下论断；

“(1)物质世界在目前有机械能不断耗散的普遍趋势。

(2)在非生命的物质过程中，任何恢复机械能而不相应地耗散更多的机械能（活动）的是不可能的……。

(3)在一段时间以前地球一定是，在一段时间以后地球也一定是不适于人类象现在这样地居住，……”

就在 1865 年那篇全面论证热力学基本理论的论文中，克劳修斯以结论的形式用最简练的语言表述了热力学的两条基本原理，认为是宇宙的基本原理：

“(1)宇宙的能量是常数。

(2)宇宙的熵趋于一个极大值。”

1867 年，克劳修斯又进一步提出：“宇宙越接近于其熵为一最大值的极限状态，它继续发生变化的机会也越减少，如果最后完全到达了这个状态，也就不会再出现进一步的变化，宇宙将处于死寂的永远状态。”

以上是众所周知的宇宙“热寂说”。他们不恰当地把局部物质世界的部分变化过程的规律推广到整个宇宙的发展全过程，同时他们不顾这些定律的适用范围和条件，把孤立体系的规律，推广到无限的、开放的宇宙，因而得到了荒谬的结论。事实上，科学后来的发展已经提供了许多事实，证明宇宙演变的过程不遵守这些结论。正如恩格斯早就指出的[①]：“放射到太空中去的热一定有可能通过某种途径（指明这一途径，将是以后自然科学的课题）转变为另一种形式，在这种运动形式中，它能够重新集结和活动起来。”

[①] 恩格斯，自然辩证法，人民出版社，1984 年，第 23 页。

§2.6 热力学第三定律的建立和低温物理学的发展

热力学第三定律是物理学中又一条基本定律，它不能由任何其它物理学定律推导得出，只能看成是从实验事实作出的经验总结。这些实验事实跟低温的获得有密切的关系。

2.6.1 气体的液化与低温的获得

低温的获得是与气体的液化密切相关的。早在十八世纪末荷兰人马伦（Martin van Marum， 1750—1837）第一次靠高压压缩方法将氨液化。1823 年法拉第在研究氯化物的性质时，发现玻璃管的冷端出现液滴，经过研究证明这是液态氯。1826 年他把玻璃管的冷端浸入冷却剂中，从而陆续液化了 H_2S，HCl，SO_2，及 C_2N_2 等气体。但氧、氮、氢等气体却毫无液化的迹象，许多科学家认为，这就是真正的“永久气体”。

接着许多人设法改进高压技术提高压力，甚至有的将压力加大到 3000 大气压，空气仍不能被液化。

气液转变的关键问题是临界点的发现。法国人托尔（C.C.Tour，1777—1859）在 1822 年把酒精密封在装有一个石英球的枪管中，靠听觉通过辨别石英球发出的噪音发现，当加热到某一温度时，酒精将突然全部转变为气体，这时压强达到 119 大气压。这使托尔成了临界点的发现者，然而当时他并不能解释。直到 1869 年安德纽斯（Thomas Andrews， 1813—1885）全面地研究了这一现象之后，才搞清楚气液转变的全过程。

安德纽斯是爱尔兰的化学家，贝伐斯特（Belfast）大学化学教授。1861 年他用了比前人优越得多的设备从事气液转变的实验，他选用 CO_2 作为工作物质，作了完整的 p–V 图，如图 2–6。由图可以看出 CO_2 气液转变的条件和压强、温度的依赖关系。当温度足够高时，气体服从波意耳定律，当温度高于临界温度时，不论加多大的压力也无法使气体液化。安德纽斯的细致测量为认识分子力开辟了道路。

“永久气体”中首先被液化的是氧。1877 年，几乎同时由两位物理学家分别用不同方法实现了氧的液化。

法国人盖勒德（Louis Paul Cailletet， 1832—1913）将纯净的氧压缩到 300 大气压，再把盛有压缩氧气的玻璃管置于二氧化硫蒸气（–29℃）中，然后令压强突降，这时在管壁上观察到了薄雾状的液氧。

■图 2–6CO_2 等温线

正当盖勒德向法国科学院报告氧的液化时，会议秘书宣布，不久前接到瑞士人毕克特（Paous–PierrePictet，1846—1929）从日内瓦打来的电报说：“今天在 320 大气压和 140 的冷度（即–140℃）下联合使用

硫酸和碳酸液化氧取得成功。”他是用真空泵抽去液体表面的蒸气，液体失去了速度最快的分子而降温，然后用降温后的液体包围第二种液体，再用真空泵抽去第二种液体表面的蒸气，它的温度必然低于第一种液体，如此一级一级联下去，终于达到了氧的临界温度。

6 年后的 1883 年，波兰物理学家乌罗布列夫斯基（S.Wrob—lewski，1845—1888）和化学家奥耳舍夫斯基（K.Olszewski，1846—1915）合作，将以上两种方法综合运用，并作了两点改进：一是将液化的氧用一小玻璃管收集，二是将小玻璃管置于盛有液态乙烯的低温槽中（温度保持在—130℃），这样他们就第一次收集到了液氧。后来奥耳舍夫斯基在低温领域里续有成就，除了氢和氦，对所有的气体他都实现了液化和固化，此外还研究了液态空气的种种性质。

1895 年德国人林德（Carl von Linde， 1842—1934）和英国人汉普孙（William Hampson， 1854—1926）同时而分别地利用焦耳和 W.汤姆生发现的多孔塞效应实现液化气体，并分别在德国和英国获得了专利。

1893 年 1 月 20 日杜瓦宣布发明了一种特殊的低温恒温器（cryostat）——后来称为杜瓦瓶。1898 年他用杜瓦瓶实现了氢的液化，达到了 20.4K。翌年又实现了氢的固化，靠抽出固体氢表面的蒸气，达到了 12K。

荷兰莱登大学的低温实验室在昂纳斯（Kamerlingh Onnes，1853—1926）的领导下于 1908 年首开记录，获得了 60C.C.的液氦，达到 4.3K，第二年达到 1.38—1.04K。

2.6.2 热力学第三定律的建立

绝对零度的概念似乎早在 17 世纪末阿蒙顿（G.Amontons）的著作中就已有萌芽。他观测到空气的温度每下降一等量份额，气压也下降等量份额。继续降低温度，总会得到气压为零的时候，所以温度降低必有一限度。他认为任何物体都不能冷却到这一温度以下。阿蒙顿还预言，达到这个温度时，所有运动都将趋于静止。

一个世纪以后，查理（Charles）和盖—吕萨克（Gay—Lussac）建立了严格的气体定律，从气体的压缩系数 a=1/273，得到温度的极限值应为—273℃。

1848 年，W．汤姆生确定绝对温标时，对绝对零度作了如下说明：

“当我们仔细考虑无限冷相当于空气温度计零度以下的某一确定的温度时，如果把分度的严格原理推延足够地远，我们就可以达到这样一个点，在这个点上空气的体积将缩减到无，在刻度上可以标以—273°，所以空气温度计的（—273°）是这样一个点，不管温度降到多低都无法达到这点。”

绝对零度不可能达到，在物理学家的观念中似乎早已隐约预见到了。但是这样一条物理学的基本原理，却是又过了半个多世纪，到 1912

年才正式提出来的。

1906 年，德国物理化学家能斯特（W.Nernst，1864—1941）在为化学平衡和化学的自发性（Chemical spontancity）寻求数学判据时，作出了一个基本假设，并提出了相应的理论——他称之为“热学新理论”，人称能斯特定理。这个理论的核心内容是：设 A 表示化学亲合势（Chemical affinity），U 表示反应热，T 表示绝对温度，则有

$$A - U = T\frac{\partial A}{\partial T}$$

这个关系也叫赫姆霍兹方程。能斯特根据实验事实，作了一个假设，即当 T→0 时，A=U，于是得

$$\lim_{T \to 0}\frac{\partial A}{\partial T} = \lim_{T \to 0}\frac{\partial U}{\partial T} = 0$$

以曲线表示如图 2–7。接着他推论说：[①]：

“在低温下，任何物质的比热都要趋向某一很小的确定值，这在温度下降时趋于一致个值与凝聚态的性质无关。”后来，能斯特通过实验证明，这个“很小的确定值”就是零，与爱因斯坦的量子比热理论一致。当时，能斯特并没有利用熵的概念，他认为这个概念不明确。但普朗克则相反，把熵当作热力学最基本的概念之一，所以当普朗克了解到能斯特的工作后，立即尝试用熵来表述“热学新理论”。他的表在温度下降时趋于一致述是：“在接近绝对零度时，所有过程都没有熵的变化”。或：

$$\lim_{T \to 0}(S_2 - S_1) = \lim_{T \to 0}\Delta S = 0$$

■图 2–7 反应热和化学亲合势在温度下降时趋于一致

1912 年能斯特在他的著作《热力学与比热》中，将“热学新理论”表述成：“不可能通过有限的循环过程，使物体冷到绝对零度。”这就是绝对零度不可能达到定律，也是热力学第三定律通常采用的表述方法。

西蒙（F. Simon，1893—1956）在 1927—1937 年对热力学第三定律作了改进和推广，修正后称为热力学第三定律的能斯特–西蒙表述：当温度趋近绝对零度时，凝聚系统（固体和液体）的任何可逆等温过程，熵的变化趋近于零。

$$\lim_{T \to 0}(\Delta S)_T = 0$$

以上对热力学第三定律的不同表述，实际上都是相当的。

2.6.3 低温物理学的发展

自从 1908 年莱顿实验室实现了氦的液化以来，低温物理学得到了迅速发展。昂纳斯的规模宏大的低温实验室成了国际上研究低温的基地。

[①] W．Nernst，TheNewHeatTheorem，Methen，1926．

他和他的合作者不断创造新的成绩，对极低温下的各种物理现象进行了广泛研究，测量了 10K 以下的电阻变化，发现金、银、铜等金属的电阻会减小到一个极限值。1911 年，他们发现汞、铅和锡等一些金属，在极低温下电阻会突然下降。1913 年昂纳斯用“超导电性”来代表这一事实，这年他获得了诺贝尔物理奖。1911—1926 年间，昂纳斯继续对液氦进行了广泛研究，并发现了其他许多超导物质，不过他一直未能实现液氦的固化。这件工作是在 1926 年由他的同事凯森（W.Keesom）在液氦上加压 25 大气压才得以完成，这时的温度为 0.71K。

1928 年凯森发现 2.2K 下液氦中有特殊的相变。十年后，苏联的卡皮查（Kaпицa）和英国的阿伦（Allen）和密申纳（Misener）分别却是同时地发现液氦在 2.2K 以下可以无摩擦地经窄管流出，一点粘滞性也没有，这种属性叫超流动性。

正当人们在用各种方法探索低温的进程中，一种崭新的致冷方法——磁冷却法应运而生，这种方法也叫顺磁盐绝热去磁冷却法。加拿大青年物理学家盖奥克（William Francis Giauque）和德国著名物理学家德拜（Pieter Debye）于 1926 年分别发表了这方面的论文。但是由于技术上的困难，直到 1933 年才由盖奥克和麦克道盖尔（Mac Dongall）在美国加州的伯克利以及德哈斯（W.J.de Haas）、韦尔斯玛（E.C.Wiersma）和克拉麦斯（H.A.Kramers）在莱顿，同时但又独立地实现，他们分别达到 0.25K 和 0.13K。后来经过近二十年的努力，用磁冷却法最低达到了 0.003K 左右。1956 年，英国人西蒙和克尔梯（Kurti）用核去磁冷却法获得 10^{-5}K。1979 年芬兰人恩荷姆（Ehnholm）等人，用级联核冷却法达到 5×10^{-8}K。

探索极低温条件下物质的属性，有极为重要的实际意义和理论价值。因为在这样一个极限情况下，物质中原子或分子的无规热运动将趋于静止，一些常温下被掩盖的现象显示出来了，这就可以为了解物质世界的规律提供重要线索。例如，1956 年吴健雄等人为检验宇称不守恒原理进行的 Co—60 实验，就是在 0.01K 的极低温条件下进行的； 1980 年，联邦德国的克利青（Klitzing）在极低温和强磁场条件下发现了量子霍尔效应，因而获 1985 年诺贝尔物理奖。

§2.7　分子运动论的发展

分子运动论是热学的一种微观理论，它是以分子的运动来解释物质的宏观热性质。它根据的两个基本概念：一个是物质是由大量分子和原子组成的；另一个是热现象是这些分子无规则运动的一种表现形式。

这两个基本概念的起源可以追溯到 17 世纪，甚至在古希腊的自然哲学家那里也可以找到思想萌芽。古代自然哲学家们往往用朴素的原子假

说来解释物质世界。公元前6世纪时，泰勒斯（Thales，公元前640—546）就假想自然界的物质全是由水和水变成的各种物质组成，例如：土是水凝固而成；空气是水稀释而成；火则是由空气受热而成。赫拉克利特（Heraclitus）则以土、气、火、水作为物质组成的四种元素。后来，德谟克利特（Democritus，公元前460—371，）认为物质皆由各种不同的微粒组成。

2.7.1　早期的分子运动论

分子运动论的兴起，与原子论的复活有密切联系。1658年伽桑狄（Gassendi）提出物质是由分子构成的，他假设分子能向各个方向运动，并由此出发解释气、液、固三种物质状态。波意耳在1662年从实验得到了气体定律，他对分子运动论的贡献主要是引入了压强的概念，并提出了关于空气弹性的定性理论。他把气体粒子比作固定在弹簧上的小球，用空气的弹性解释气体的压缩和膨胀，从而定性地说明了气体的性质。牛顿对波意耳定律也作过类似的说明，他认为：气体压强与体积成反比的原因是由于气体粒子对周围的粒子有斥力，而斥力的大小与距离成反比。胡克则把气体压力归因于气体分子与器壁的碰撞。

由此可见，17世纪已经产生了分子运动论的基本概念，能够定性地解释一些热学现象。但是在18世纪和19世纪初，由于热质说的兴盛，分子运动论受到压抑，发展的进程甚为缓慢。

最早对热是一种运动提出确定数量关系的是瑞士人赫曼（J. Hermann，1678—1733）。早在1716年他提出一个理论，认为[①]：“成分相同的物体中的热是热体的密度和它所含粒子的乱运动的平方以复杂的比例关系组成。”所谓“乱运动”就是分子的平均速率，所谓“热”就是指的压强；他的观念可以表述为一个公式：

$$p = K\rho\bar{v}^2$$

其中p为压强，$\bar{v}$为分子平均速率，ρ为密度，K为一常数，仅仅取决于物体的特性。

第一位接近真正的气体分子运动论的，是瑞士著名数学家欧拉。1729年，他发展了笛卡儿的学说，把空气想象成是由堆集在一起的旋转球形分子构成。他假设在任一给定温度下，所有空气和水的粒子旋转运动的线速率都相同，由此推出状态方程：

$$p \approx \frac{1}{3}\rho v^2$$

他得到p与ρ的正比关系，解释了波意耳定律，并粗略计算出分子速率v=477米/秒。尽管欧拉的分子运动图象与现代对气态的观点不符，但他的结果仍可看成是取得了初步的成功。

另一位瑞士数学家D．伯努利对分子运动论也作了重要贡献。他在

[①] 转引自 C.Truesdall，Essays in the History of Mechanics, Springer- Verlag, 1968, p. 272.

1738 年发表的《水力学》一书中，有专门的篇幅用于讨论分子运动，并从分子运动推导出了压强公式，得到了比波意耳定律更普遍的公式。■

图 2—8D.伯努利讨论分子运动论用图

D.伯努利首先考虑在圆柱体容器中密封有无数的微小粒子（如图 2—8），这些粒子在运动中碰撞到活塞，对活塞产生一个力。他假设粒子碰前和碰后都具有相同的速度。他分析：“当活塞 EF 移到 ef 时，由于两方面原因它受到流体的力将会更大：一方面是由于空间缩小，（单位空间的）粒子数按比例变得更大；另一方面因为每个给定的粒子碰撞得更为频繁。……粒子间的距离越短，碰撞发生得越频繁。……显然，碰撞次数反比于粒子表面之间的平均距离。”

为了计算第一种原因带来的影响，伯努利考虑粒子似乎都是静止的。若取 EC=1，eC=S。活塞从 EF 移到 ef 时，其高度由 1 减至 S。考虑到粒子均匀分布，三个垂直方向粒子数因此各增 1/（$S^{(1/3)}$）倍，那么接近活塞处的粒子数应由 n 增至 $n/S^{(2/3)}$。他认为粒子是直径为 d 的球体，初始平均距离为 D，则粒子表面之间的平均距离为 D—d。活塞落下后，粒子间的平均距离为 $DS^{1/3}$，所以表面之间的平均距离为 $DS^{1/3}-d$。

假定压强与接触到活塞表面的粒子数成正比，与平衡距离成反比，伯努利求得压缩前后压强之比为：

$$\frac{p_0}{p}=S^{2/3}\cdot\frac{DS^{1/3}-d}{D-d}$$

接着，伯努利又作了一个假设：如果活塞上荷重 P 无限加大，则活塞必降到使所有粒子都互相接触，这个位置为 m、n，设此时的体积缩减为原来的 a 倍，则 $\frac{D}{d}=a^{-1/3}$。于是压缩后与压缩前压强比：

$$\frac{p}{p_0}=\frac{1-a^{1/3}}{S-a^{1/3}S^{2/3}}$$

这是一个普遍结论。然后，伯努利作了如下推论：(a)如果 a=0，即粒子不占体积，则

$$\frac{p}{p_0}=\frac{1}{S}$$

这正是波意耳定律。

(b)如果能从极密的空气用实验确定波意耳定律的偏差，就可以测出系数 a。不过，实验必需施加极大的压力，测量要非常精确，并需注意保持温度不变。

可见，D．伯努利早在 1738 年就注意到要修正波意耳定律，比范德瓦耳斯早 150 年之久。遗憾的是，伯努利的理论被人们忽视了整整一个世纪。

---

[1] 转引自 Magie(ed.),ASourceBookinPhysics,McGraw-Hill,1935,p.249.

继伯努利之后，俄国人罗蒙诺索夫（M.B.ЛoMohocoB，1711—1765）在 1746 年写的《关于热和冷原因的思索》和 1748 年写的《试拟建立空气弹力的理论》两篇论文里，论证了热的本质在于运动，讨论了气体的性质，阐述了气体分子无规乱运动的思想，并肯定了运动守恒定理在热学现象中的应用。

另外还有瑞士的德鲁克（J.A.Deluc，1727—1817）和里萨奇（G.L.Lesage，1724—1803），意大利的维斯柯维基（R. Boscovich，1711—1787）都曾致力于分子运动论。维斯柯维基是 18 世纪突出的思想家之一，他提出过分子斥力模型。

19 世纪上半叶，分子运动论续有进展，值得提到的是如下几位：

1816 年，英国的赫拉帕斯（J.Herapath，1790—1868）向皇家学会提出自己的分子运动理论。他明确地提出温度取决于分子速度的思想，并对物态变化、扩散、声音的传播等现象作出定量解释，但是权威们认为他的论文太近于遐想，拒绝发表。

1846 年，苏格兰的瓦特斯顿（J.J.Waterston，1811—1883）提出混合气体中不同比重的气体，所有分子的 mv^2 的平均值应相同。这大概是能量均分原理的最早说法。

焦耳在 1847—1848 年也曾发表过两篇关于分子运动论演讲。他指出，热是分子运动的动能或分子间相互作用的能量。他还求出了气体分子的运动速率，并据此计算出气体的比热，与实验结果进行了比较。焦耳的文章发表在一不知名的杂志上，因此很少为人们所知，对分子运动论的复活影响不大。

2.7.2 分子运动论的复活

热质说衰落后，热的动力论取而代之，于是就创造了一个对分子运动论复活很有利的形势，因为人们自然地就会想到，既然热和机械功有当量关系，可以相互转变，热就应该与物体各组成部分的运动有确定关系。正因为这个原因在建立热力学上作过重大贡献的实验物理学家焦耳和理论物理学家克劳修斯都分别提出了自己对分子运动的看法和有关理论。可见，分子运动论在 19 世纪中叶，紧跟着热力学第一定律、第二定律的提出而得到发展，有其必然的逻辑联系。

通常都把分子运动论的复活，归功于德国化学家克里尼希（A.K.Krönig，1822—1879），他激发了克劳修斯和麦克斯韦进一步发展这个理论。1856 年克里尼希在《物理学年鉴》上发表了一篇短文，题为《气体理论的特征》，这篇论文虽然没有什么新的观点，也不完全正确，但却有相当影响。这是因为当时克里尼希是知名的科学家，柏林高等工业大学的教授，《物理学进展》的主编。他在柏林物理学会很有声望。他的论文正好发表于热力学第一定律建立之后不久，因此很受科学界的注意。

克里尼希的方法跟 D．伯努利和赫拉帕斯没有实质上的差别。他从最简单的完全弹性球假设出发，假设这些弹性球沿三个相互垂直方向均等地以同一速率运动，他写道：“假想有一个匣子，取自绝对弹性的材料，里面有许多绝对弹性球，如果静止下来，这些小球只占匣子容量的极小一部分。令匣子猛烈摇晃，于是小球都运动起来了。如果匣子重归静止，小球将维持运动。在小球之间以及小球与器壁间的每次撞击之后，小球的运动方向和速率都要改变。容器中气体的原子就象这些小球一样地行动。

“气体的原子并不是围绕平衡位置振动，而是以恒速沿直线运动，直到碰上气体的另一个原子或固态（液态）的边界。特别是两个互相不接触的气体原子，它们之间不会产生相互排斥力。”

“与气体的原子相反，即使最平的器壁也要看成是很粗糙的。结果，每个气体原子的路程必定极不规则，以至于无法计算。”

克里尼希接着提到概率理论，“靠概率理论的定律，我们就可以用完全规则性代替完全不规则性。”不过，他实际上并未用上概率理论。

克里尼希根据分子动量的改变推出公式 $p=nmc^2/V$，其中 V 为体积，n 为分子数，m 与 c 为分子的质量和速度。然后，他假设绝对温度相当于 mc^2，这样就把自己的公式等同于波意耳和盖·吕萨克定律，他研究了重力对气体的作用，证明在容器上下不同的高度应有压强差，这个压强差与温度无关。

克里尼希还粗略地讨论了气体分子速度和比热问题，他指出：氢气要比更重的气体，如氧扩散得更快。他还对气体向真空膨胀温度不变，膨胀时气体推动活塞后会变冷，受压缩则气体会变热等等现象作出解释。不过，他没有提到这些方面的实验。

他的工作可以说是早期分子运动论的结束，因为到此为止，分子运动论充其量也只能推证理想气体状态方程，定性解释扩散和比热。要作进一步研究，靠完全弹性球的假设已经满足不了需要，必然需要进一步考虑分子速度的统计分布和分子间的作用力。从这一点来看，克劳修斯和麦克斯韦才是分子运动论真正的奠基人。

2.7.3　克劳修斯对分子运动论的贡献

早在 1850 年，当克劳修斯初次发表热力学论文时，他就设想可以把热和功的相当性以热作为一种分子运动的形式体现出来。在谈到焦耳的摩擦生热实验之后，他写道：“热不是物质，而是包含在物体最小成份的运动之中。”

1855 年，克劳修斯被任命为瑞士苏尼克市爱根诺西塞（Ei–dgenössiche）工业大学物理学教授，使他有机会来到数学之邦的

[①] 转引自 C.Truesdell，“Early Kinetic The ories of Gases”, in Arch. Hist. Exa. Sci.,15, (1975), p.20．

瑞士。不久克里尼希的文章发表，促使他在 1857 年对分子运动论作了全面的论述，明确提出在分子运动论中应该应用统计概念。其实，他的见解在读到克里尼希论文之前就已形成。

克劳修斯对分子运动论主要有以下几方面的贡献：

(a)明确引进了统计思想；

(b)引进平均自由路程概念；

(c)提出“维里理论”，这个理论后来对推导真实气体的状态方程很有用。不过，他自己并没有用之于真实气体，他原来的目的是要为热力学定律找到普遍的力学基础。

(d)更严格地推导了理想气体状态方程，得：$\frac{3}{2}pV=\frac{1}{2}nmu^2$，此式右端表示分子平动动能的总和。克劳修斯由此推算出气体分子的平均速度为：

$$u=485\sqrt{\frac{T}{273\cdot\rho}}\ (米/秒)$$

其中 T 为绝对温度，ρ为气体密度。对于氧，u=461 米/秒；对于氮，u=492 米/秒；对于氢，u=1844 米/秒（温度为融冰点）。(e)根据上述方程确定气体中平动动能K和总动能H的比值，例如简单气体的$\frac{K}{H}=0.6315$。从而判定气体分子除了平动动能以外，还有其他形式的能量。

下面我们介绍克劳修斯是怎样引出平均自由路程这个概念的。

1858 年克劳修斯发表《气体分子的平均自由路程》一文[①]，是为了回答德国物理学家布斯–巴罗特(C. H. D. Buys–Ballot)对分子运动论的责难。布斯–巴罗特在 1858 年 2 月号的《物理学年鉴》上发表题为《论我们称之为热和电的那种运动的性质》的文章。他提问道：既然分子运动速率很大，每秒达几百米，为什么实际观察到的气体扩散和气体混合的速率比这个速率小得多？他写道：“为什么烟尘在室内停留于不动的空气中这样长的时间？”“如果硫化氢或氯气在房子的一角生成，需好几分钟后在另一角才能嗅到，可是分子在 1 秒钟内早该沿房子飞行好几个来回了。”

克劳修斯针对布斯–巴罗特的质疑进行了研究，他试图根据真实气体中分子之间作用力不能略去不计这一假设作出说明，在推算过程中引出了平均自由路程的概念。他的思路是，设分子间相距较远时有吸力，相距较近时有斥力，于是就可以规定某一距离ρ，在这个距离上吸力与斥力平衡；也就是说，在碰撞中两个分子的重心相距不会少于ρ，ρ就叫“作用球半径”。克劳修斯提出这样一个问题：“分子在进入另一分子的作用球前平均走多远？”他断言，如果所有其他分子相对于某一个分

[①] 转引自 S.Brush(ed.)KineticTheory，vol.1Pergamon，1965，p.135．

子都处于静止的话，则分子的平均路程将会比其他分子以同一速率向所有方向运动时大。这两种情况的平均路程大约成 $\frac{1}{4}$：1。克劳修斯先假定所有其他分子均处于静止，再作如下推导：

他将气体可能达到的整个空间沿垂直于该分子运动方向平行地分隔为许多层，若分子自由通过厚度为 1 的一层空间的几率是 e^{-a}，则未遇其它分子作用球而自由通过厚度为 x 这一层空间的几率应是

$$W=e^{-ax}$$

其中α是与作用球面积有关的待定正数。

对于非常薄的一层，厚度 δ≪1，其几率为

$$W_\delta = e^{-a\delta} \approx 1-\alpha\delta \qquad (2-4)$$

α的求法如下：考虑含有 n 个分子，分子平均中心距为λ，取厚度为λ的一层。假设这些分子排列成两维的方阵，则方阵总面积为 $n\lambda^2$，作用球的面积为 $n\pi\rho^2$，作用球面积所占比例为 $\pi\rho/\lambda^2$ 对厚度为δ的一层，这个面积比应乘以 δ/λ，即 $\pi\rho^2\delta/\lambda^3$。由于分子穿过某一层空间而未受碰撞的几率 W_δ 正好等于作用球未复盖面积所占的比例，所以

$W_\delta=1-(\pi\rho^2\delta/\lambda^3)$

与(2－4)式比较，可得

$\alpha=\pi\rho^2/\lambda^3$

所以穿过厚度为 x 的空间的几率为

$$W = e^{-(\pi\rho^2/\lambda^3)x}$$

然后，克劳修斯推导分子与作用球相遇前所经路程的平均值，这也就是平均自由路程。

他考虑 N 个分子从一个方向穿过空间，则由(2–5)式知，自由穿过 X 厚度的分子数为 $Ne^{-(\pi\rho^2/\lambda^3)x}$，那么，穿过厚度为 $(x+dx)$ 层的分子数为：

$$Ne^{-(\pi\rho^2/\lambda^3)(x+dx)} \approx Ne^{-(\pi\rho^2/\lambda^3)x(1-\frac{\pi\rho^2}{\lambda^3})}$$

于是，在 x 与(x+dx)之间遇上作用球的分子数，也即停留在这一层上的分子数就是以上两者的差值，即

$$Ne^{-(\pi\rho^2/\lambda^3)x} \quad (\frac{\pi\rho^2}{\lambda^3})dx$$

如果忽略无穷小的差别，这些分子经过的路程可以看作是 x，所以这些分子与其经过路程的乘积是

$$Ne^{-(\pi\rho^2/\lambda^3)x} \quad (\frac{\pi\rho^2}{\lambda^3})\chi dx$$

求出所有 dx 层的上述乘积的总和，即从 x=0 到 x=∞积分得：

$$\int_0^\infty Ne^{-(\pi\rho^2/\lambda^3)x}(\frac{\pi\rho^2}{\lambda^3})\chi dx = N\frac{\lambda^3}{\pi\rho^2}$$

上述结果再除以分子数 N，即得平均（自由）路程：

$$\lambda^3 / \pi \rho^2 \qquad (2-6)$$

(2–6)式只是一个分子运动而其它所有分子静止的情况。若其它分子以同样速率运动，前面已提到这时平均路程应将(2–6)式乘以系数 3/4，得：

$$l = \frac{3}{4} \frac{\lambda^3}{\pi\rho^2} \qquad (2-7)$$

这就是克劳修斯在 1857 年用独特的方法推出的平均自由路程公式。他将(2–7)式变换形式，得：

$$\frac{l}{\rho} = \frac{\lambda^3}{\frac{4}{3}\pi\rho^3}$$

于是得到一个简单的规律：“分子的平均自由路程与作用球半径之比，等于气体所占整个空间与分子作用球实际充满空间之比。”这一规律曾被范德瓦耳斯用来推导真实气体状态方程中的体积改正项。

克劳修斯虽然提出了分子速率的无规分布的概念，但是实际上并没有考虑分子速率的分布，而是按平均速率计算，所以结果并不完全正确。进一步的发展就要由麦克斯韦和玻尔兹曼来解决了。

克劳修斯这种求平均值的方法后来在粒子碰撞问题上计算粒子散射几率有重要应用。

2.7.4 范德瓦耳斯方程的建立

分子运动论逐步形成了一门有严密体系的精确科学。与此同时实验也越做越精，人们发现绝大多数气体的行为与理想气体的性质不符。1847 年勒尼奥（Henri Victor Regnault，1810—1878）做了大量实验，证明除了氢以外，没有一种气体严格遵守波意耳定律，这些气体的膨胀系数都会随压强增大而变大。1852 年焦耳和 W.汤姆生合作做了多孔塞实验。发现实际气体在膨胀过程中内能会发生变化，证明分子之间有作用力存在。1863 年安德纽斯的 CO_2 等温线（图 2—6）说明 CO_2 气体存在一个临界温度 31.3℃，高于这个温度无论如何也无法使气体液化。1871 年 J．汤姆生（James Thomson，1822—1892）对气液两态问题提出了新的见解，他对安德纽斯的实验结果做了补充，认为在临界温度以下气液两态应有连续性的过渡，并且提出一个“～”形的等温线。不过他既没作定量计算也没有用分子理论加以解释。

荷兰物理学家范德瓦耳斯（Johannes Diderik Van der Waals，1837—1923）1873 年在博士论文《论气态和液态的连续性》中考虑了分子体积和分子间吸力的影响，推出了著名的物态方程：

$$(p + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT$$

后来人们称之为范德瓦耳斯方程。他还导出了 b 是分子体积的 4 倍。这个方程不仅能解释安德纽斯的实验结果及 J．汤姆生的见解，而且能从常数 a、b 值计算出临界参数，这对“永久气体”液化的理论起了指导作用。

这篇论文是用荷兰文发表的，起初影响不大，后由于麦克斯韦注意到了他的论文，并于次年（1874 年）在有国际影响的《自然》杂志上对该文作了热情的述评，于是迅速为世人注意。1910 年范德瓦耳斯由于气体和液体状态方程的工作而获诺贝尔物理奖。

1881 年范德瓦耳斯进一步提出“对应态定律”，用临界参数 $\pi=p/p_c$，$\phi=V/V_c$，$\theta=T/T_c$ 表示物质的状态，建立了一个适用于任何流体的普遍方程：

$$(\pi+\frac{3}{\phi^2})(3\phi+1)=8\theta$$

尽管这个方程并不十分精确，但对实际工作例如对于早期尝试进行氢、氦的液化仍有一定的指导意义。

下面介绍范德瓦耳斯方程的推导过程。

在范德瓦耳斯之前，早在 18 世纪伯努利就曾提出过应在理想气体状态方程的体积因子中引进改正项 b，即

$$p(V-b)=RT$$

b 代表分子自身所占的体积。1863 年黑恩(Hirn)用 $(p+\phi)(V-b)=RT$ 表示状态方程，他已经意识到 ϕ 是体积的函数，并且认为，对于液体 ϕ 远大于 p。他们的工作对范德瓦耳斯都很有启示。

范德瓦耳斯在他的博士论文中首先讨论了压强的修正，他写道[①]：

“我们在研究任一粒子受力时，只需考虑以它为中心的一极小半径的球内的其它粒子，这个球称为‘作用球’，距离大于球半径的作用力即不可察觉。”“……（如果密度处处均匀），取作用球时如不包括边界，所有各点均应处于平衡，……只有边界上厚度是作用球半径的一层内的粒子会受到指向内侧的作用力……”。“考虑在边界层内有一无限薄（壁）的圆柱，并假想在这一层下物体内部的一块空间，这个空间里包含对薄圆柱有吸力的每个分子。如果在此空间内有一个分子处于静止，那么我们需要知道力的规律以便估计它对圆柱的吸力；但如分子处于运动之中，并且能同样占领空间的任何部分，则上述（估计吸力的）困难就大体上不存在了，我们可以把分子施加的吸力看成是它在空间各个不同位置的平均值。对这一空间内同时存在的第二个分子也可作类似处理。简言之，上述空间的物质所施加的吸力正比于物质之量，或正比于其密度。这同样适用于圆柱内被吸引的分子，所以吸力与密度平方成正比，或与体积的平方成反比。”于是范德瓦耳斯把状态方程写成：

$$(p+\frac{a}{V^2})(V-b)=RT$$

范德瓦耳斯进一步研究 b 与分子体积的关系。在那篇博士论文中他写道：

---

① 转引自 S.G.Brush，Am.J.Phys.29(1961)p.601．

“起初我认为外部体积和分子所占体积之差就是分子运动的空间，但进一步考虑我相信能够证明，当物质聚集到一定程度以后，外部体积必须减去分子体积的 4 倍，越是聚集，必须减去的值是分子体积越小的倍数。”

4 倍因子是在平均自由路程的基础上推出来的，范德瓦耳斯继续写道：

“……正如一个球投向墙壁，它的自由路程会被看成是运动开始时球中心到墙的距离，其实自由路程是这段距离减去球的半径。所以考虑到分子的直径，自由路程变小了，碰撞次数变大了，于是反抗的压强也就按比例地变大。”

范德瓦耳斯假设分子排成正方体，每个分子可看成是直径为 σ 的球，分子间的平均距离为 λ，根据克劳修斯的推算，如果其余分子均处于静止，则一个单独运动的分子的平均自由路程为

$$l=\frac{\lambda^3}{\pi\sigma^2}$$

如果其余分子均以同样速度运动，则平均自由程应为

$$l_1=\frac{3\lambda^3}{4\pi\sigma^2}$$

利用这一关系范德瓦耳斯继续推算分子直径对平均自由程的影响。他写道：

“……如果所有的碰撞都发生在沿分子中心联线的运动中，则 l_1 应减去碰撞发生时的中心间距，因为自由程的始端和末端都必须减去分子直径的一半，故

$$l_2=l_1-\sigma$$

或 $$l_2=\frac{\lambda^3-4\pi\sigma^3/3}{\frac{4\pi\sigma^2}{3}}\text{；}\frac{l_2}{l_1}=\frac{\lambda^3-4\pi\sigma^3/3}{\lambda^3}$$

考虑到 σ/2 是被看成球的分子的半径，$n\lambda^3$ 等于单位体积，以 v 表示；$4\pi n\sigma^3/3$ 等于分子本身体积的 8 倍，得：

$$\frac{l_2}{l_1}=\frac{v-8b_1}{v}$$

这里 b_1 是分子的体积。”

范德瓦耳斯进一步考虑，认为 $8b_1$ 应改为 $4b_1$，他的理由是：“（上面考虑的）碰撞仅限于对心的，因此取平均时，l_1 应减去比 σ 小的值。从下面的考虑，我们可以找到应从 l_1 减去 σ 多大的分值。在碰撞的瞬间，运动分子的中心处在围绕第二个分子的中心、半径为 σ 的球面上。设想这个球面被垂直于运动方向的平面平分。若是对心碰撞，运动分子的中心到此平面的距离最大，在中间的那些情况，运动分子中心处于半球面的其它各点上，路程所减去的值应是运动分子的中心距该平面的距离，

所以平均路程所减去的平均值应是半球面的平均坐标。但由于运动分子中心落在半球面上任一点的机会相等，我们必须对半球面上相等面元取平均坐标，而不是象容易想到的那种对平面上的相等面元。我们必须求出：

$$\int Zd\omega / \int d\omega$$

这里 dω是面元。这是半球面的重心的坐标，已知是半径的一半。所以 l_1 应减去$\frac{\sigma}{2}$而不是σ。令$l_1 - \frac{\sigma}{2} = l_3$，

我们得到$l_2 / l_1 = \frac{v - 4b_1}{v}$。”

于是范德瓦耳斯导出了 $b=4b_1$ 的关系。

范德瓦耳斯之所以能取得如此突出的成就，并在这一领域产生巨大影响，主要是由于他对分子运动比前人有更明确的概念，他继承并发展了波意耳、伯努利、克劳修斯等人的研究成果，并注意到安德鲁斯等人已经从实验发现了气液连续的物态变化，这些实验结果为他的工作提供了实践基础。

§2.8　统计物理学的创立

2.8.1　麦克斯韦速度分布律

麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831—1879）发现气体分子速度分布律是分子运动论和统计力学的发展史中的一件大事。他是在 1859 年开始进行这项工作的，当时他 28 岁，已是国王学院(King’sCollege)的教授。1855 年他开始研究土星卫环的稳定性时，就曾注意到卫环质量的分布问题，他企图用概率理论处理，但是由于问题过于复杂似乎没有希望解决，所以只好放弃。不过他对概率理论的兴趣并未中断。

概率理论的发展要追溯到十九世纪初，1808 年，爱尔兰数学家阿德润（R. Adrain，1775—1843）在分析观测数据的误差中，提出了误差分布的两个实例。1823—1828 年，德国数学家高斯（C. E. Gauss，1777—1855）对概率理论作了系统论述，推出了正则方程，也叫高斯分布律。到了 1835 年，天文学家魁泰勒特（L.Quetelet，1796—1874）发表了论述统计理论的专著，他还因擅长于将统计学推广到社会学领域而闻名。1848 年麦克斯韦的老师、爱丁堡大学的佛贝斯（Forbes，1815—1854）曾对 1767 年一次双星观测的统计结果进行过验算，引起了麦克斯韦对概率的兴趣，当时他刚进入爱丁堡大学，年仅 17 岁。后来他全面阅读了拉普拉斯（Laplace）等人关于统计学的著作。1850 年英国著名物理学家和天文学家赫谢尔（J.F.W.Herschel，1792—1871）在《爱丁堡评论》上发表了长篇述评，介绍魁泰勒特的工作。这篇评论给麦克斯韦强烈印象。

1859 年 4 月麦克斯韦偶然地读到了克劳修斯关于平均自由路程的那

篇论文，很受鼓舞，重燃了他原来在土星卫环问题上运用概率理论的信念，认为可以用所掌握的概率理论对分子运动论进行更全面的论证。

可是在十九世纪中叶，这种新颖思想却与大多数物理学家的观念相抵触。他们坚持把经典力学用于分子的乱运动，企图对系统中所有分子的状态（位置、速度）作出完备的描述。而麦克斯韦认为这是不可能的，只有用统计方法才能正确描述大量分子的行为。他从分子乱运动的基本假设出发得到的结论是：气体中分子间的大量碰撞不是导致象某些科学家所期望的使分子速度平均，而是呈现一速度的统计分布，所有速度都会以一定的几率出现。1859 年麦克斯韦写了《气体动力理论的说明》一文，这篇论文分三部分：第一部分讨论完全弹性球的运动和碰撞，第二部分讨论两类以上的运动粒子相互间扩散的过程，第三部分讨论任何形式的完全弹性球的碰撞。在第一部分他写道[①]：“如果有大量相同的球形粒子在完全弹性的容器中运动，则粒子之间将发生碰撞，每次碰撞都会使速度变化，所以在一定时间后，活力将按某一有规则的定律在粒子中分配，尽管每个粒子的速度在每次碰撞时都要改变，但速度在某些限值内的粒子的平均数是可以确定的。”

接着他用概率方法来求这个速度在某一限值内的粒子的平均数，即速率分布律：

“令 N 为粒子总数，x，y 和 z 为每个粒子速度的三个正交方向的分量。x 在 x 与 x+dx 之间的粒子数为 $Nf(x)dx$，其中 f（x）是 x 的待定函数；y 在 y 与 y+dy 之间的粒子数为 $Nf(y)dy$；z 在 z 与 z+dz 之间的粒子数为 $Nf(z)dz$，这里 f 始终代表同一函数。”

在此他作出了关键性的假设，即由于不断碰撞，粒子三个互相垂直的速度分量互相独立，他写道：

“速度 x 的存在绝不以任何方式影响速度 y 与 z，因为它们互成直角，并且互相独立，所以速度在 x 与 x+dx，y 与 y+dy 以及 z 与 z+dz 之间的粒子数为

$$Nf(x)f(y)f(z)dxdydz.$$

如果假设 N 个粒子在同一时刻由原点出发，则此数将为经过单位时间以后在体积元（dxdydz）内的粒子数，因此单位体积内的粒子数应是

$$Nf(x)f(y)f(z)$$

由于坐标的方向完全是任意的，所以此数仅仅和与原点的距离有关，即

$$f(x)f(y)f(z)=\phi(x^2+y^2+z^2)$$

解此函数方程，可得

$$f(x)=Ce^{Ar^2}，\phi(r^2)=C^3e^{Ar^2}$$

---

① Scientific Papers of J.C.Maxwell，vol.1，Cambridge，1890，p.377.

$(r^2=x^2+y^2+z^2)$

如果取 A 为正数，则当速度增大时，粒子数随之增大，于是发现粒子的总数将是无穷大。所以，我们取 A 为负数，并令其等于$-1/a^2$，则 x 与 x+dx 之间的个数为

$$NCe^{-(x^2/a^2)}dx$$

从 $x=-\infty$ 到 $x=+\infty$ 积分，我们得到粒子总数为

$$Nc\sqrt{\pi}\alpha = N$$

因为

$$C = \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}},$$

所以 f(x) 为

$$\left(\frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}}\right)e^{-(x^2/a^2)},$$

这是分速度 x 的分布函数。y 和 z 的分布函数与此类似。麦克斯韦进一步得到如下几个推论：

“第一，速度分解在某一方向上的分量 x 在 x 与 x+dx 之间的粒子数为

$$N\left(\frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}}\right)e^{-(x^2/a^2)}dx$$

第二，速率在 v 与 v+dv 之间的粒子数为

$$N\left(\frac{4}{\alpha^3\sqrt{\pi}}\right)v^2e^{-(v^2/a^2)}dv$$

第三，求 v 的平均值：可将所有粒子的速率加在一起，除以粒子总数，即

$$\text{平均速率} = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}}$$

第四，求 v^2 的平均值：可将所有粒子的 v^2 的数值加起来再除以 N，即

$$v^2\text{的平均值} = \frac{3}{2}\alpha^2$$

这比平均速率的平方大，正应如此。”

在作了以上推导以后，麦克斯韦作出结论：

“由此可见，粒子的速度按照‘最小二乘法’理论中观测值误差的分布规律分布。速度的范围从 0 到∞，但是具有很大速度的粒子数相当少……”

麦克斯韦的这一推导受到了克劳修斯的批评，也引起其他物理学的怀疑。这是因为他在推导中把速度分解为 x，y 和 z 三个分量，并假设它们互相独立地分布。麦克斯韦自己也承认“这一假设似乎不大可靠”，难以令人信服，在以后的几年里他继续研究，例如他曾对热传导的机理

进行分析，由于没有得到满意的结果，手稿没有发表。直到 1866 年，麦克斯韦对气体分子运动理论作了进一步的研究以后，他写了《气体的动力理论》的长篇论文，讨论气体的输运过程。其中有一段是关于速度分布律的严格推导，这一推导不再有“速度三个分量的分布互相独立”的假设，也得出了上述速度分布律[①]。它不依赖于任何假设，因而结论是普遍的。在 1859 年的文章里，还讨论了分子无规则运动的碰撞问题。麦克斯韦考虑到分子速度分布，计算了

平均碰撞频率为：$\sqrt{2}\pi\rho^2 Nv$，比克劳修斯推算出的：$\frac{4}{3}\pi\rho^2 Nv$更准准确（N 为单位体积内的分子数，v 为分子的平均速率）。

1860 年麦克斯韦用分子速度分布律和平均自由程的理论推算气体的输运过程：扩散、热传导和粘滞性，取得了一个惊人的结果：“粘滞系数与密度（或压强）无关，随绝对温度的升高而增大。”极稀薄的气体和浓密的气体，其内摩擦系数没有区别，竟与密度无关，这确是不可思议的事。于是麦克斯韦和他的夫人一起，在 1866 年亲自做了气体粘滞性随压强改变的实验。他们的实验结果表明，在一定的温度下，尽管压强在 10mmHg 至 760mmHg 之间变化，空气的粘滞系数仍保持常数。这个实验为分子运动论提供了重要的证据。

麦克斯韦速度分布律是从概率理论推算出来的，人们自然很关心这一规律的实际可靠性。然而，在分子束方法发展之前，对速度分布律无法进行直接的实验验证。首先对速度分布律作出间接验证的是通过光谱线的多普勒展宽，这是因为分子运动对光谱线的频率会有影响。1873 年瑞利(Rayleigh)用分子速度分布讨论了这一现象，1889 年他又定量地提出多普勒展宽公式。1892 年迈克耳孙(A.A.Michelson)通过精细光谱的观测，证明了这个公式，从而间接地验证了麦克斯韦速度分布律。1908 年理查森(O.W.Richardson)通过热电子发射间接验证了速度分布律。1920 年斯特恩(O.Stern)发展了分子束方法，第一次直接得到速度分布律的证据。直到 1955 年才由库什(Kusch)和米勒(R.C.Miller）对速度分布律作出了更精确的实验验证[①]。

2.8.2　玻尔兹曼分布

玻尔兹曼（Ludwig Boltzmann， 1844—1906）是奥地利著名物理学家，曾是斯忒藩（J. Stefan）的学生和助教。1876 年任维也纳物理研究所所长，他用毕生精力研究分子运动论，是统计物理学的创始人之一。

1866 年，年轻的玻尔兹曼刚从维也纳大学毕业，他想从力学原理推导出热力学定律。这年，他发表了一篇论文，企图把热力学第二定律跟力学的最小作用原理直接联系起来，但论据不足，没有成功。正好这时

[①] 详见沈慧君，物理，15,(1986),p.323．

[①] 详见郭奕玲、沈慧君，《著名经典物理实验》，（北京科技出版社，1991 年），第十一章。

麦克斯韦发表分子速度分布律不久，引起了玻尔兹曼的极大兴趣，但他感到麦克斯韦的推导不能令人满意，于是就开始研究分子运动论。

1868 年玻尔兹曼发表了题为《运动质点活力平衡的研究》的论文。他明确指出，研究分子运动论必须引进统计学，并证明，不仅单原子气体分子遵守麦克斯韦速度分布律，而且多原子分子以及凡是可以看成质点系的分子在平衡态中都遵从麦克斯韦速度分布律。

1871 年，玻尔兹曼又连续发表了二篇论文，一是《论多原子分子的热平衡》，另一是《热平衡的某些理论》。文中他研究了气体在重力场中的平衡分布，假设分子具有位能 mgz，则分布函数应为：

$$f = \alpha e^{-\beta(\frac{1}{2}mv^2 + mgz)} \qquad (2-8)$$

其中$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$，α、β为常数，取决于温度。

玻尔兹曼在他的研究中作出下列结论：“在力场中分子分布不均匀、位能不是最小的那部分分子按指数定律分布”；“在重力作用下，分子随高度的分布满足气压公式，所以气压公式来源于分子分布的普遍规律。”

所谓气压公式是从 17 世纪末以后许多人研究大气压强经验所得。哈雷分析托里拆利、盖里克（O.von Guericke，1602—1686）和波意耳的实验，曾得到这样的结论：高度$h = A\ln\frac{B}{C}$，其中A、B、C均为常数。普拉斯（Laplace，1749—1827）则于 1823 年第一次用密度的形式表示：

$\rho = \rho_0 e^{-ah}$，

α是一常数，当时拉普拉斯未加解释。玻尔兹曼从分子运动论推导出这一结果，对分子运动论当然是一个极有力的证据。

玻尔兹曼又进一步将（2–8）式推广到任意的位场中，得

$$f(v_x, v_y, v_z, x, y, z) = ae^{-\beta\left[\frac{1}{2}m(v_x^2+v_y^2+v_z^2)+U(x、y、z)\right]} \qquad (2-9)$$

这里 U(x，y，z)表示气体分子在位场中的位能，(2–9)式也可称为玻尔兹曼分布，后来又表述为：

$$f=ae^{-E/kT} \qquad (2-10)$$

其中$E = \sum\left(\frac{1}{2}mv^2\right) + \sum V$，（2-10）式是统计物理学的重要定律之一。

在 1871 年的论文中，玻尔兹曼还提出另一种更普遍的推导方法，不需要对分子碰撞作任何假设，只假设一定的能量分布在有限数目的分子之中，能量的各种组合机会均等（他假定在动量空间内的能量曲面上作均匀分布），也就是说，能量一份一份地分成极小的但却是有限的份额，于是把这个问题进行组合分析，当份额数趋向无穷大，每份能量趋向无穷小时，获得了麦克斯韦分布。玻尔兹曼这一处理方法有重要意义，后

来普朗克（Planck）正是采用这种方法建立量子假说的。

2.8.3 H 定理和热力学第二定律的统计解释

玻尔兹曼并不满足于推导出了气体在平衡态下的分布律，他接着进一步证明，气体（如果原来不处于平衡态）总有要趋于平衡态的趋势。1872 年，他发表了题为《气体分子热平衡的进一步研究》的长篇论文，论述气体的输运过程，在这篇论文中他提出了著名的 H 定理[①]。玻尔兹曼证明了，如果状态的分布不是麦克斯韦分布，随着时间的推移，必将趋向于麦克斯韦分布。他引入了一个量

$$E=\int_0^{\infty} f(x,t)\left[\ln\left(\frac{f(x,t)}{\sqrt{x}}\right)-1\right]dx$$

其中 x 为分子能量。他证明 E 永不增加，必向最小值趋近，以后保持恒定不变。相应地，f(x，t)的最终值应该就是麦克斯韦分布，即：

$$\frac{dE}{dt}<0，如 f\neq const．\sqrt{x}e^{-hx}$$

$$\frac{dE}{dt}=0，如 f=const，\sqrt{x}e^{-hx}$$

h 为与绝对温度有关的常数。

后来在 1896—1898 年玻尔兹曼发表的《气体理论演讲集》中，他用符号 H 代替 E，并将上式表示成：

$$\frac{dH}{dt}\leq 0$$

这就是著名的玻尔兹曼 H 定理（在 19 世纪叫做玻尔兹曼最小定理）。这个定理指明了过程的方向性，和热力学第二定律相当，玻尔兹曼的 H 函数实际上就是熵在非平衡态下的推广。

1877 年玻尔兹曼进一步研究了热力学第二定律的统计解释，这是因为 H 定理的提出引起一些科学家的责难，他们认为：个别分子间的碰撞是可逆的，但由此导出了整个分子体系的不可逆性，实在是不可思议，这就是所谓“可逆性佯谬”。1874 年，W.汤姆生首先提出这个问题，接着洛喜密脱（J. Loschmidt，1821—1895）也提出疑问。玻尔兹曼针对这些责难作了回答，他认为：实际世界的不可逆性不是由于运动方程、也不是由于分子间作用力定律的形式引起的。原因看来还是在于初始条件。对于某些初始条件不寻常的体系的熵也许会减小（H 值增加）。只要把平衡状态下分子的所有运动反向，回到平衡态即可获得这样的初始条件。但是玻尔兹曼断言，因为绝大多数状态都是平衡态，所以具有熵增加的初始状态有无限多种。

玻尔兹曼写道：“（热力学）第二定律是关于几率的定律，所以它的结论不能靠一条动力学方程（来检验）。”在讨论热力学第二定律与

[①] 转引自 S.Brush(ed.)KineticTheory,vol．2,Pergamon,1966,p.88.

几率的关系中，他证明熵与几率 W 的对数成正比。后来普朗克把这个关系写成

$$S=k\ln W$$

并且称 k 为玻尔兹曼常数。有了这一关系，其他热力学量都可以推导出来。

这样就可以明确地对热力学第二定律进行统计解释：在孤立系统中，熵的增加对应于分子运动状态的几率趋向最大值（即最可几分布）。熵减小的过程（H 增大）不是不可能，系统达到平衡后，熵值可以在极大值附近稍有涨落。

玻尔兹曼坚决拥护原子论，反对“唯能论”，与马赫（E. Mach，1838—1916）、奥斯特瓦尔德（Ostwald，1853—1932）进行过长期的论战，为分子运动论建立了完整的理论体系，同时也为分子运动论和热力学的理论综合打下了基础。但是由于当时人们并没有认识到玻尔兹曼工作的意义，反而对他进行围攻。他终因长期孤军论战、忧愤成疾于 1906 年厌世自杀。

2.8.4 统计系综和吉布斯的工作

系综概念的提出和运用标志着分子运动论发展到了统计力学的新阶段。系综是一个虚构的抽象概念，代表了大量性质相同的（力学）体系的集合，每个体系各处于相互独立的运动状态中。研究大量体系在相空间的分布，求其统计平均，就是统计力学的基本任务。

早在 1871 年，玻尔兹曼就认识到了没有必要把单个粒子作为统计的个体，开始转到研究大量体系在相空间中的分布。他在 1877 年采用了一种统计方法，不考虑碰撞过程的复杂细节，而直接统计可能有的粒子组态，这实际上就是一种特殊的系综（微正则系综）统计方法。

麦克斯韦也对统计系综有明确的认识。1878 年他写道[①]：

“我发现，这样做是方便的，即不考虑由质点组成的一个体系，而是考虑除了在运动的初始环境各不相同外，彼此在所有方面都相似的大量体系。我们把自己的注意力局限于在某一给定时刻处于某一相的这些体系的数目，这个相是由给定限度内的那些变量规定。”

遗憾的是麦克斯韦没能进一步找到恰当的数学方法加以表述，就于 1879 年去世了。

玻尔兹曼和麦克斯韦的统计思想，后来在吉布斯（JosiahWillard Gibbs， 1839—1903）的工作中得到了发展。吉布斯是美国耶鲁大学数学物理教授，开始研究的是热力学，曾连续发表好几篇开创性的论文。其中《流体热力学中的图示法》创立了几何热力学；《利用曲面对物质的热力学性质作几何描述的方法》解决了异相共存和临界现象的问题；

[①] Scientific Papers of J.C.Maxwell,vol.2,Cambridge,1890,p.713.

《论非均匀物质的平衡》提出了非均匀体系的热力学基本方程，使热力学能应用于化学、拉伸弹性、表面张力、电磁、电化学等诸多方面的问题。他还引入了化学势、自由能、焓等基本概念，建立了一系列热力学函数之间的热力学方程，使热力学发展成为一门体系严密、应用方便的普遍理论。

但是，热力学是唯象的宏观理论，它的参数要通过实验才能测得，对此吉布斯并不满意。他在研究热力学第二定律时，就萌发了用力学定律和统计方法来阐述热力学的思想。例如，1876 年他写道：“熵不可能不得到补偿而减小，这种不可能性看来要改成不可几性。”他期望将“热力学的合理基础建立在力学的一个分支上”，这个分支就是由他命名、并且由他创立的统计力学。他认为，“热力学定律能够轻易地从统计力学的原理得出。”他仔细研究过麦克斯韦和玻尔兹曼关于统计方法的论著，经过多年的反复思考和推敲，又在耶鲁大学多次讲授过有关课程，终于在 1901 年写成了《统计力学基本原理》一书。这本书 1902 年发表后，影响很大，成了统计力学的经典著作。

在这本书的序中，吉布斯写道[①]：“如果我们放弃编造物体结构假说的种种企图，把统计的探究当作合理力学的一个分支，我们就可以避免最严重的困难。”

吉布斯就是把大量分子当作一个力学体系，不作任何假设，他把整个体系当作统计的对象，求体系处在相空间各处的几率分布，由此研究体系的统计规律并求相应的宏观量。

吉布斯成功的关键在于把刘维定理当作统计力学的基本方程，有了这一方程，一个系综任何时刻的相密度，因而相几率就可以唯一地确定下来。

刘维(JosephLiouville，1809—1882)是法国著名数学家，1838 年研究哈密顿方程正则变换时，证明相体积元与坐标的选择无关。这个定理在分析力学有广泛应用，例如，在甲可比(Jacobi)的《动力学演讲集》（1866 年）中就用到了刘维定理。玻尔兹曼曾给这个定理作过统计解释。吉布斯在留学法国时，曾听过刘维的讲课。

在刘维定理的基础上吉布斯把系综分成三种类型：一种叫微正则系综，即由大量的孤立系统组成，玻尔兹曼研究的就是这种系综。但微正则系综只是一种特殊情况，更普遍的是正则系综。正则系综是由与外界仅有能量交换的大量体系组成。吉布斯认为，这种系综是稳定分布的最简单形式，由此得到的平均值与热力学关系最密切，因而最适于求物质在平衡时的宏观性质。吉布斯再进一步推广，提出了“巨正则系综”的概念，这类系综包括了与外界有粒子交换的体系，可以应用到化学反应

[①] The Collected Works of J.W.Gibbs,vol.2,Yale,1957,p.IX

问题。

吉布斯通过对上述三种系综的研究，提出并发展了统计平均、统计涨落和统计相似三种方法，建立了逻辑上自洽、而又与热力学经验公式相一致的理论体系，从而完成了热力学与分子运动论两个方面的理论综合。

第三章　电磁学的发展

§3.1　历史概述

静磁现象和静电现象很早就受到人类注意。公元前 6、7 世纪发现了磁石吸铁、磁石指南以及摩擦生电等现象。系统地对这些现象进行研究则始于 16 世纪。1600 年英国医生吉尔伯特（WilliamGilbert，1544—1603）发表了《论磁、磁体和地球作为一个巨大的磁体》（De magnete，magneticisque corporibus et de magnomag-nete tellure）。他总结了前人对磁的研究，周密地讨论了地磁的性质，记载了大量实验，使磁学从经验转变为科学。书中他也记载了电学方面的研究。

静电现象的研究要困难得多，因为一直没有找到恰当的方式来产生稳定的静电和对静电进行测量。只有等到发明了摩擦起电机，才有可能对电现象进行系统的研究，这时人类才开始对电有初步认识。

1750 年米切尔（John Michell，1724[？]—1793）提出磁极之间的作用力服从平方反比定律，1785 年库仑（Charles Augustin Coulomb，1736—1806）公布了用扭秤实验得到电力的平方反比定律，使电学和磁学进入了定量研究的阶段。

1780 年，伽伐尼（Aloisio Galvani，　1737—1798）发现动物电，1800 年伏打（Alessandro Volta，1745—1827）发明电堆，使稳恒电流的产生有了可能，电学由静电走向动电，导致 1820 年奥斯特（Hans Christian Oersted，1777—1851）发现电流的磁效应。于是，电学与磁学彼此隔绝的情况有了突破，开始了电磁学的新阶段。

在这以后，电磁学的发展势如破竹。19 世纪二、三十年代成了电磁学大发展的时期。

首先对电磁作用力进行研究的是法国科学家安培（AndréMarie mperè，1775—1836），他在得知奥斯特发现之后，重复了奥斯特的实验，提出了右手定则，并用电流绕地球内部流动解释地磁的起因。接着他研究了载流导线之间的相互作用，建立了电流元之间的相互作用规律——安培定律。与此同时，比奥–沙伐定律也得到发现。

英国物理学家法拉第对电磁学的贡献尤为突出。1831 年发现电磁感应现象，进一步证实了电现象与磁现象的统一性。法拉第坚信电磁的近距作用，认为物质之间的电力和磁力都需要由媒介传递，媒介就是电场和磁场。

电流磁效应的发现，使电流的测量成为可能。1826 年欧姆(Georg Simon Ohm，1784—1854)因而确定了电路的基本规律——欧姆定律。

及至 1865 年，麦克斯韦把法拉第的电磁近距作用思想和安培开创的

电动力学规律结合在一起，用一套方程组概括电磁规律，建立了电磁场理论，预测了光的电磁性质，终于实现了物理学史上第二次大综合。

§3.2　早期的静电学研究

早在公元前 5 世纪的希腊时代，就有了关于静电现象的历史记载。Electricity（电）这个字的起源就来自希腊文的“琥珀”(elec-tron)。我国
西汉末年（公元 20 年前）有“玳瑁吸褡”的记载，说的是经过摩擦
的玳瑁能够吸引微小的物体。西晋时期，《博物志》中，也有摩擦起电的记载。当然比起磁学来，电学发展还是较晚的，这主要是因为磁学有指南针等方面的应用，而电学则不过是宫庭中的娱乐对象。直到 1660 年盖里克发明摩擦起电机，才有可能对电现象作详细观察和细致研究。这种摩擦起电机实际上是一个可以绕中心轴旋转的大硫磺球，用人手或布帛摸抚转动的球体表面，球面上就可以产生大量的电荷。1705 年豪克斯比(F.Hauksbee)用空心玻璃壳代替硫磺球，后来别的实验家又陆续予以改进，直到 18 世纪末，摩擦起电机都一直是研究电现象的基本工具。

1720 年，格雷(S.Gray，1675—1736)研究了电的传导现象，发现导体与绝缘体的区别。随后，他又发现导体的静电感应现象。

1733 年，杜菲(duFay，1698—1739)经过实验区分出两种电荷，他分别称之为松脂电（即负电）和玻璃电（即正电），并由此总结出静电作用的基本特性：同性相斥，异性相吸。

莱顿瓶的发明使电现象得到更深入的研究，这是克莱斯特(Kleist，1700—1748)和马森布洛克(Musschenbrock，1692—1761)在 1745—1746 年分别独立作出的。

富兰克林(BenjaminFranklin，1706—1790)进一步对放电现象进行研究。他发现了尖端放电，发明了避雷针，研究了雷电现象，从莱顿瓶的研究中，提出了电荷守恒原理。1747 年富兰克林用电流体假说阐述了这一思想。

接下来是康顿(John Canton)在 1754 年用电流体假说解释了静电感应现象。

至此，静电学三条基本原理：静电力基本特性、电荷守恒和静电感应原理都已经建立，对电的认识有了初步的成果。然而，如果不建立定量的规律，电的知识还不能形成一门严密的科学。

§3.3　库仑定律的发现和验证

库仑定律是电磁学的基本定律之一。它的建立既是实验经验的总

结，也是理论研究的成果。特别是力学中引力理论的发展，为静电学和静磁学提供了理论武器，使电磁学少走了许多弯路，直接形成了严密的定量规律。从库仑定律的发现可以获得许多启示，对阐明物理学发展中理论和实验的关系，了解物理学的研究方法均会有所裨益。

3.3.1　从万有引力得到的启示

18 世纪中叶，牛顿力学已经取得辉煌胜利，人们借助于万有引力的规律，对电力和磁力作了种种猜测。

德国柏林科学院院士爱皮努斯(F.U.T.Aepinus，1724—1802)1759 年对电力作了研究。他在书中假设电荷之间的斥力和吸力随带电物体的距离的减少而增大，于是对静电感应现象作出了更完善的解释。不过，他并没有实际测量电荷间的作用力，因而只是一种猜测。

1760 年，D．伯努利首先猜测电力会不会也跟万有引力一样，服从平方反比定律。他的想法显然有一定的代表性，因为平方反比定律在牛顿的形而上学自然观中是很自然的观念，如果不是平方反比，牛顿力学的空间概念就要重新修改（注）。

富兰克林的空罐实验（也叫冰桶实验）对电力规律有重要启示。1755 年，他在给兰宁(John Lining)的信中，提到过这样的实验①：

“我把一只品脱银罐放在电支架（按：即绝缘支架）上，使它带电，用丝线吊着一个直径约为 1 英寸的木椭球，放进银罐中，直到触及罐的底部，但是，当取出时，却没有发现接触使它带电，象从外部接触的那样。”

注：自然现象中许多过程都服从平方反比关系，例如：光的照度、水向四面八方喷洒、均匀固体中热的传导等无不以平方反比变化，这从几何关系就可以得到证明。因为同一光通量、水量、热量等等，通过同样的球面，球面的面积与半径的平方成正比（即$S=\frac{4}{3}\pi r^2$），所以，强度与半径的平方成正比。如果在传播过程中有干扰的媒质，例如有一透镜置于光路中，就会使光的分布发生畸变，这就出现各向异性。所以，平方反比定律假定的基础是空间的均匀性和各向同性。

富兰克林的这封信不久跟其他有关天电和尖端放电等问题的信件，被人们整理公开发表流传甚广，很多人都知道这个空罐实验，不过也和富兰克林一样，不知如何解释这一实验现象。富兰克林有一位英国友人，名叫普利斯特利（Joseph Priest-ley，1733—1804），是化学家，对电学也很有研究。富兰克林写信告诉他这个实验并向他求教。普利斯特利专门重复了这个实验，在 1767 年的《电学历史和现状及其原始实验》一书中他写道①：

---

① Goodman，TheIngeniusDr.Franklin，Oxford，1931，p.144.

① 转引自：D.M.Turner,Makers of Science：Electricity and Magnetism，Oxford，1927, p.28.

“难道我们就不可以从这个实验得出结论：电的吸引与万有引力服从同一定律，即距离的平方，因为很容易证明，假如地球是一个球壳，在壳内的物体受到一边的吸引作用，决不会大于另一边的吸引。”

普利斯特利的这一结论不是凭空想出来的，因为牛顿早在 1687 年就证明过，如果万有引力服从平方反比定律，则均匀的物质球壳对壳内物体应无作用。他在《自然哲学的数学原理》第一篇第十二章《球体的吸力》一开头提出的命题，内容是：“设对球面上每个点都有相等的向心力，随距离的平方减小，在球面内的粒子将不会被这些力吸引。”

牛顿用图 3–1 作出证明，他写道[②]：

“设 HIKL 为该球面，P 为置于其中的一粒子，经 P 作两根线 HK 和 IL，截出两段甚小的弧 HI、KL；由于三角形 HPI 与 LPK 是相似的，所以这一段弧正比于距离 HP，LP；球面上任何在 HI 和 KL 的粒子，终止于经过 P 的直线，将随这些距离的平方[①]而定。所以这些粒子对物体 P 的力彼此相等。因为力的方向指向粒子，并与距离的平方成反比。而这两个比例相等，为 1∶1。因此引力相等而作用在相反的方向，互相破坏。根据同样的理由，整个球面的所有吸引力都被对方的吸引力推动。Q.E.D.”

■图 3–1 牛顿证明球壳内任一点不受球壳引力作用

牛顿的论述是众所周知的。显然，读过牛顿著作的人都可能推想到，凡是遵守平方反比定律的物理量都应遵守这一论断。换句话说，凡是表现这种特性的作用力都应服从平方反比定律。这就是普利斯特利从牛顿著作中得到的启示。

不过，普利斯特利的结论并没有得到科学界的普遍重视，因为他并没有特别明确地进行论证，仍然停留在猜测的阶段，一直拖了 18 年，才由库仑正式提出。

在这中间有两个人曾作过定量的实验研究，并得到明确的结论。可惜，都因没有及时发表而未对科学的发展起到应有的推动作用。

一位是苏格兰的罗比逊（John Robison）。他注意到 1759 年爱皮努斯那本用拉丁文写的书，对爱皮努斯的猜测很感兴趣，就设计了一个杠杆装置，如图 3－2。装置很精巧，利用活动杆所受重力和电力的平衡，从支架的平衡角度求电力与距离的关系。不过，他的装置只适于对同性电荷进行实验。电力与两球距离的关系如果用公式 $f \propto \frac{1}{r^{2+\delta}}$ 表示，他得到 $\delta=0.06$。这个 δ 就叫指数偏差。罗比逊认为，指数偏大的原因应归于实验误差，由此得出结论，正如爱皮努斯的推测，电力服从平方反比定律。

■图 3–2 罗比逊的实验装置

[②] I.Newton, Mathematical Principles of Natural Philosophy, California, 1946,p.193.

[①] 意即以 IH 和 KL 为界的粒子的质量，应与弧长的平方成正比，而弧长又与距离成正比。

另一位是卡文迪什(Henry Cavendish，17310–1810)。他在 1773 年用两个同心金属壳作实验，如图 3–3。外球壳由两个半球装置而成，两半球合起来正好形成内球的同心球。卡文迪什这样描述他的装置[①]：

“我取一个直径为 12.1 英寸的球，用一根实心的玻璃棒穿过中心当作轴，并覆盖以封蜡。……然后把这个球封在两个中空的半球中间，半球直径为13.3英寸，$\frac{1}{20}$英寸厚。……然后，我用一根导线将莱顿瓶的正极接到半球，使半球带电。”

■图 3–3 卡文迪什的实验装置

卡文迪什通过一根导线将内外球联在一起，外球壳带电后，取走导线，打开外球壳，用木髓球验电器试验内球是否带电。结果发现木髓球验电器没有指示，证明内球没有带电，电荷完全分布在外球上。

卡文迪什将这个实验重复了多次，确定电力服从平方反比定律，指数偏差不超过 0.02。

卡文迪什这个实验的设计相当巧妙。他用的是当年最原始的电测仪器，却获得了相当可靠而且精确的结果。他成功的关键在于掌握了牛顿万有引力定律这一理论武器，通过数学处理，将直接测量变为间接测量，并且用上了示零法精确地判断结果，从而得到了电力的平方反比定律。

卡文迪什为什么要做这个实验呢？话还要从牛顿那里说起。

牛顿在研究万有引力的同时，还对自然界其他的力感兴趣。他把当时已知的三种力——重力、磁力和电力放在一起考虑，认为都是在可感觉的距离内作用的力，他称之为长程力(long–rangeforce)。他企图找到另外两种力的规律，但都未能如愿。磁力实验的结果不够精确。他在《原理》的第三篇中写道[①]：

“重力与磁力的性质不同。……磁力不与所吸引的物质的量成比例。……就其与距离的关系，并不是随距离的平方而是随其三次方减小。这是我用粗略的试验所测的结果。”

至于电力，他也做过实验，但带电的纸片运动太不规则，很难显示电力的性质。

在长程力之外，他认为还有另一种力，叫短程力（short–rangeforce）。他在做光学实验时，就想找到光和物质之间的作用力（短程力）的规律，没有实现。他甚至认为还有一些其他的短程力，相当于诸如聚合、发酵等现象。

3.3.2　卡文迪什和米切尔的工作

牛顿的思想在卡文迪什和另一位英国科学家米切尔的活动中得到了体现。米切尔是天文学家，也对牛顿的力学感兴趣。在 1751 年发表的短

[①] 转引自：D.M.Turner，MakersofScience：ElectricityandMagnetism，Oxford，1927，p.34.

[①] 牛顿著，郑太朴译，自然哲学之数学原理，（商务印书馆，1931 年）p.719.

文《论人工磁铁》中，他写道[①]：

“每一磁极吸引或排斥，在每个方向，在相等距离其吸力或斥力都精确相等……按磁极的距离的平方的增加而减少，”他还说：“这一结论是从我自己做的和我看到别人做的一些实验推出来的。……但我不敢确定就是这样，我还没有做足够的实验，还不足以精确地做出定论。”

既然实验的根据不足，为什么还肯定磁力是按距离的平方成反比地减少呢？甚至这个距离还明确地规定是磁极的距离，可是磁极的位置又是如何确定的呢？显然，是因为米切尔先已有了平方反比的模式。

在米切尔之前确有许多人步牛顿的后尘研究磁力的规律，例如：哈雷（1687 年）、豪克斯比、马森布洛克等人都做过这方面的工作，几乎连绵百余年，但都没有取得判决性的结果。

米切尔推断磁力平方反比定律的结论可以说是牛顿长程力思想的胜利，把引力和磁力归于同一形式，促使人们更积极地去思考电力的规律性。

米切尔和卡文迪什都是英国剑桥大学的成员，在他们中间有深厚的友谊和共同的信念。米切尔得知库仑发明扭秤后，曾建议卡文迪什用类似的方法测试万有引力。这项工作使卡文迪什后来成了第一位直接测定引力常数的实验者。正是由于米切尔的鼓励，卡文迪什做了同心球的实验。

但是卡文迪什的同心球实验结果和他自己的许多看法，却没有公开发表。直到 19 世纪中叶，开尔文（即 W.汤姆生）发现卡文迪什的手稿中有圆盘和同半径的圆球所带电荷的正确比值，才注意到这些手稿的价值，经他催促，才于 1879 年由麦克斯韦整理发表。卡文迪什的许多重要发现竟埋藏了一百年之久。对此，麦克斯韦写道[①]：

“这些关于数学和电学实验的手稿近 20 捆，”其中“物体上电荷（分布）的实验，卡文迪什早就写好了详细的叙述，并且费了很大气力书写得十分工整（就象要拿出去发表的样子），而且所有这些工作在 1774 年以前就已完成，但卡文迪什（并不急于发表）仍是兢兢业业地继续做电学实验，直到 1810 年去世时，手稿仍在他自己身边。”

卡文迪什出生于贵族家庭，家产厚禄，他都没有兴趣，一心倾注在科学研究之中。早年攻化学和热学，发现氢氧化合成水。他后来做的电学实验有：电阻测量，比欧姆早几十年得到欧姆定律；研究电容的性质和介质的介电常数，引出了电位的概念；他发现金属的温度越高，导电能力越弱，等等。他的同心球实验比库仑用扭秤测电力的实验早 11 年，

[①] 转引自：A.Wolf,A History of Science,Technology and Philosophy in the Eigh-teenth Century,Mac Millian,1939,p.270.

[①] J.C. Maxwell (ed.), The Electrical Researches of the Honourable Henry Cavnendish, Cambridge, 1879,p.45.

而且结果比库仑精确。对于卡文迪什把全付心身倾注在科学研究工作上的这种精神，麦克斯韦写道[②]：

“卡文迪什对研究的关心远甚于对发表著作的关心。他宁愿挑起最繁重的研究工作，克服那些除他自己没有别人会重视甚至也没有别人知道的那些困难。我们毋庸怀疑，他所期望的结果一旦获得成功，他会得到多么大的满足，但他并不因此而急于把自己的发现告诉别人，不象一般搞科研的人那样，总是要保证自己的成果得到发表。卡文迪什把自己的研究成果捂得如此严实，以致于电学的历史失去了本来面目。”

卡文迪什性情孤僻，很少与人交往，唯独与米切尔来往密切，他们共同讨论，互相勉励。米切尔当过卡文迪什的老师，为了“称衡”星体的重量，曾从事大量天文观测。他们的共同理想是要把牛顿的引力思想从天体扩展到地球，进而扩展到磁力和电力。米切尔发现了磁力的平方反比定律，但他没能完成测量电力和地球密度的目标。卡文迪什正是为了实现米切尔和他自己的愿望而从事研究。可以说，米切尔和卡文迪什是在牛顿的自然哲学的鼓舞下坚持工作的。他们证实了磁力和电力这些长程力跟引力具有同一类型的规律后，并不认为达到了最终目标，还力图探求牛顿提出的短程力。卡文迪什在他未发表的手稿中多处涉及动力学、热学和气体动力学，都是围绕着这个中心，只是没有明确地表达出来。米切尔则把自己对短程力的普遍想法向普利斯特利透露过，在普利斯特利的著作——1772 年发表的《光学史》一书中记述了米切尔的思想[①]。

3.3.3 库仑的扭秤实验

关于库仑发明扭秤，并用扭秤精确地测量电力和磁力的实验，已经在别的地方有详尽描述[②]，这里只想探讨一个问题，就是库仑是不是事先就有平方反比的思想框架？

从史料中可以看到如下几点：

1．库仑虽然直接测量了电荷之间作用力与距离的关系，但精确度毕竟有限，如果用平方反比关系表示，其指数偏差可达 0.04。如果库仑不是先有平方反比的概念，他为什么不用$F\propto\frac{1}{r^{2.04}}$或$F\propto\frac{1}{r^{1.96}}$来表示呢？

2．库仑并没有改变电量进行测量，而是说“假说的前一部分无需证明”，显然他是在模仿万有引力定律，认为电力分别与相互作用的两个电荷量成正比，就如同万有引力分别与相互作用的两个物体的质量成正比一样。

3．库仑在另一篇论文中还提到磁力的平方反比关系，写道：

[②] 同上。

[①] R.McCormmach,BJHS,4(1968)p.126.

[②] 郭奕玲、沈慧君，著名经典物理实验（北京科技出版社，1991）第三章、第十四章。

“看来，磁流体即使不在本质上，至少也在性质上与电流体相似。基于这种相似性，可以假定这两种流体遵从若干相同的定律。”

库仑的实验当然是认真的，他如实地发表了实验结果。不过，他在行文中用了如下词汇：“非常接近 16∶4∶1，可见，磁力和距离的平方成反比”。

显然，库仑在研究电力和磁力时也是把它们跟万有引力类比，事先建立了平方反比的概念。

3.3.4 类比方法的意义

从库仑定律的发现经过我们可以看到类比在科学研究中所起的作用。如果不是先有万有引力定律的发现，单靠实验具体数据的积累，不知要到何年才能得到严格的库仑定律的表达式。实际上，整个静电学的发展，都是在借鉴和利用引力理论的已有成果的基础上取得的。我们可以从下面的年表中看到概况。

年代	人名	贡献
1687 年	牛顿	发表《原理》，阐述万有引力定律
1777 年	拉格朗日	定义了势，势的梯度就是引力
1782 年	拉普拉斯	发表拉普拉斯方程 $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}=-4\pi\rho$
1813 年	泊松	指出拉普拉斯方程也适用于静电学，静电学，并提出泊松方程：$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}=-4\pi\rho$
1828 年	格林	提出格林定理
1839 年	高斯	提出高斯定理

§3.4 稳恒电流的获得与研究

18 世纪末，电学从静电领域发展到电流领域。这是一大飞跃，发端于动物电的研究，意大利学者伽伐尼和伏打在这方面起了先锋作用。

3.4.1 伽伐尼的研究

伽伐尼是一位解剖学教授，1780 年 9 月的一天，他在解剖青蛙时偶然发现电效应，他和学生一起作解剖实验，一个学生用手术刀轻轻触动了青蛙的小腿神经，这只青蛙立即抽搐了起来。当时，另一学生正在附近练习使用摩擦起电机。他注意到青蛙抽搐时，正好是起电机发出火花的那一瞬间。伽伐尼没有放过这一机会，立即研究起来。他早就知道，

动物有某些特殊行为与电有关。例如，从古代人们就发现有两种会放电的鱼，叫鱼鳗和鱼■。莱顿瓶发明后，人们开始考虑鱼鳗的电效应可能与莱顿瓶类似。1772 年，英国的华尔士发现鱼鳗的放电是在背脊和胸腹的两点之间。解剖的结果是：在鱼体内有一长圆柱体，电就是从那里发出来的。伽伐尼敏锐地感到这是研究动物电的一个极好范例。他想会不会在青蛙体内也有类似组织？这个现象和手术刀有什么关系？为什么正好在这时起电机也放电呢？

伽伐尼为了掌握青蛙抽搐的规律，安排了一系列实验。起先他只用刀尖触青蛙神经，然后只让起电机打电火花，都不能使蛙腿抽搐。

接着，伽伐尼把青蛙用铜钩子挂在花园的铁栏杆上，结果发现在闪电来临时，青蛙也会抽搐。

伽伐尼又把青蛙放在铁桌上，用铜钩子碰青蛙腿，只要铜钩子另一端触及桌面，即使没有任何其它带电体在场，蛙腿也会抽搐。显然他已触及现象的本质，可是，由于动物电的观念先入为主，他坚持用动物电说明所有这些现象，使他无力作出正确的解释。伽伐尼在 1791 年发表了题为《肌肉运动中的电力》，文中写道[①]：

“我们想到用不导电或不大导电的其它物体，如由玻璃、橡皮、树脂、石或木等物质制成的，但都是干的东西来试。结果都不发生这样的现象，既看不到肌肉的紧缩，也看不到肌肉的运动。这当然激起了我们的惊奇，并使我们以为动物本身就有电。我们认为这种看法是正确的，因为我们的假定是，在紧缩现象发生时，有一种很细的神经流体从神经流到肌肉中去，就象莱顿瓶中的电流一样。”

伽伐尼的著作发表以后，欧洲各国对动物电形成了研究热潮，很多人投入到这项实验之中。

3.4.2　伏打的研究

在这些研究者中间，有一位意大利的自然哲学教授伏打，他细心重复了伽伐尼的实验，发现伽伐尼的神经电流说有问题。他拿来一只活青蛙，用两种不同金属构成的弧叉跨接在青蛙身上，一端触青蛙的腿，一端触青蛙的脊背，青蛙就可以抽搐，用莱顿瓶经青蛙的身体放电，青蛙也发生抽搐，说明两种不同金属构成的弧叉和莱顿瓶的作用是一样的。换句话说，这些现象是外部电流作用的结果。

后来，在伏打的外部电（金属接触说）和伽伐尼的内部电（神经电流说）之间展开了长期的争论。

为了阐明自己的观点，伏打继续进行了大量实验。他比较了各种金属，按金属相互间的接触电动势把各种金属排列成表，其中有一部分是：锌—铅—锡—铁—铜—银—金—石墨。只要将表中任意两种金属接触，

[①] W.F.Magie,A Source Book in Physics,McGraw-Hill,1935,p.441.

排在前面的金属必带正电，排在后面的必带负电。这样，伏打一举就全面地解释了伽伐尼和其他人做过的各种动物电实验。

1800 年，伏打进一步把锌片和铜片夹在用盐水浸湿的纸片中，重复地叠成一堆，形成了很强的电源，这就是著名的伏打电堆。把锌片和铜片插入盐水或稀酸杯中，也可以形成电源，叫做伏打电池。伏打为了遵重伽伐尼的先驱性工作，在自己的著作中总是称之为伽伐尼电池。所以，以他们两人名字命名的电池，实际上是一回事。

伏打电堆（电池）的发明，提供了产生恒定电流的电源，使人们有可能从各方面研究电流的各种效应。从此，电学进入了一个飞速发展的时期——研究电流和电磁效应的新时期。

3.4.3 欧姆定律的发现

欧姆定律是电学中又一条基本定律，发现于 1826 年。欧姆（G.S.Ohm）原是一名中学数学、物理教师。他是在傅里叶（J.B.J.Fourier）的热传导理论的启发下进行电学研究的。傅里叶假设导热杆中两点之间的热流量与这两点的温度差成正比，然后用数学方法建立了热传导定律。欧姆认为电流现象与此类似，猜想导线中两点之间电流也许正比于这两点的某种推动力之差。欧姆称之为电张力（electric tension）。这实际上是电势概念。

为了证实自己的观念，欧姆下了很大功夫进行实验研究。开始欧姆所用电源是伏打电堆，由于这种电源不稳定，给欧姆的实验带来很大困难。1821 年塞贝克（T.J.Seebeck）发明温差电偶。波根道夫（J.C.Poggendorff）建议欧姆采用温差电偶做电源，这才得到稳定的电源。

■图 3–4 欧姆的实验装置

当时，电流强度的测量还是尚未解决的技术难题。欧姆先是打算用电流的热效应，从热膨胀的效应来测量电流强度。后来，欧姆自己设计了一种电流扭秤，把电流的磁效应和库仑扭秤结合在一起，测量电流强度是通过挂在扭丝下的磁针所偏转的角度。这一装置如图 3–4。温差电池是由弯成 abb′a′形的铋条和两根铜条组成，ab 端插入装有碎冰雪的容器中，a′b′端则插入另一装有沸水的容器中。电流扭秤的扭丝和磁针置于圆筒形玻璃罩中，磁针偏转的角度用一放大镜观测。

欧姆取八根粗细相同，长度不同的板状铜丝，分别接入电路，测出每次的电流磁作用强度（实际上是与电流强度成比例关系的磁针偏转角度）。最后表示成：

$$X=\frac{\alpha}{b+x},$$

其中 X 表示长度为 x 的导体所对应的磁作用强度，a 与 b 是依赖于电路的两个常数。我们现在可以判断，欧姆的 a 相当于电动势，b 相当于除待测导体之外的回路电阻，X 相当于电流强度。

1826 年，欧姆先后发表了两篇论文。第一篇题为：《论金属传导接触电的定律及伏打仪器和希外格尔倍加器的理论》，报导了他的实验结果。第二篇题为《由伽伐尼电力产生的电现象的理论》。他仿照傅里叶的热传导理论，从理论上推出如下公式：

X＝kw（a/l）

及 u–c=±（x/l）a，

其中 X 是长度为 l、截面为 w、导电率为 k 的导体中的电流强度，a 为导体两端的电张力（势）差，u 为导体中某一变点（位置为 x）的电张力（即电势），c 为一与 x 无关的常数。

接着，欧姆以等效长度$L = L = \frac{l}{kw}$代入第一个公式，得到：

$$X = \frac{\alpha}{L},$$

这就是现在的欧姆定律，等效长度实际上就是电阻。

次年，欧姆发表《用数学推导的伽伐尼电路》一书，严格推导了电路定律。

欧姆定律的建立在电学发展史中有重要意义。但是当时欧姆的研究成果并没有得到德国科学界的重视。直到 1841 年，英国皇家学会才肯定欧姆的功绩，那一年，欧姆获得了英国皇家学会的科普利奖。

§3.5　电流的磁效应

电和磁有没有联系？这是先人经常思索的问题。“顿牟缀芥，磁石引针”说明电现象和磁现象的相似性。电力和磁力都遵守平方反比定律，说明它们有类似的规律。但是相似性并不等于本质上有联系。17 世纪初，吉尔伯特就断言，它们之间没有因果关系，库仑也持同样观点。然而实际事例不断吸引人们注意。例如：1731 年有一名英国商人诉述，雷闪过后，他的一箱新刀叉竟带上了磁性。1751 年富兰克林发现在莱顿瓶放电后，缝纫针磁化了。电真的会产生磁吗？这个疑问促使 1774 年德国一家研究机构悬奖征解，题目是：“电力和磁力是否存在实际和物理的相似性？”许多人纷纷作实验进行研究，但是，在伏打发明电堆以前，这类实验很难成功，因为没有产生稳恒电流的条件。不过，即使有了伏打电堆，也不一定能立即找到电和磁的联系。

例如，1805 年有两个德国人把伏打电堆悬挂起来，企图观察电堆在地磁的作用下是不是跟磁针一样也会改变方向。这一类的尝试当然是不成功的。

1820 年，丹麦物理学家奥斯特也做起了这一实验。他信奉康德的哲学，认为自然界各种基本力是可以相互转化的。奥斯特在 1812 年就在论文中写过：

“我们应该检验的是：究竟电是否以其最隐蔽的方式对磁体有类似的作用。”

他深信电和磁有某种联系，就像电和发热发光的现象有联系一样。他在通电的导线前面放一根磁针，企图用通电的导线吸引磁针。然而尽管导线灼热了，甚至烧红发光了，磁针也毫无动静。

1820 年 4 月，奥斯特在作有关电和磁的演讲时，尝试将磁针放在导线的侧面，正当他接通电源时，他发现磁针轻微地晃动了一下，他意识到这正是他多年盼望的效应。

经过反复实验，奥斯特终于查明电流的磁效应是沿着围绕导线的螺旋方向。1820 年 7 月 21 日，他以拉丁文简洁地报导了 60 多次实验的结果。

§3.6　安培奠定电动力学基础

奥斯特发现电流磁效应的消息传到德国和瑞士后，正在日内瓦的法国科学家阿拉哥（Arago）闻讯赶回巴黎，向法国科学院报告并演示了奥斯特的实验，引起法国科学界的极大兴趣。比奥（J. B.Biot， 1774—1862）和沙伐（Felix Savart，1791—1841）更仔细地研究了直线载流导线对磁针的作用，确定这个作用力正比于电流强度，反比于电流与磁极的距离，力的方向垂直于这一距离。后来拉普拉斯从数学上推导出电流元的作用可表示为：

$$\frac{i}{r^3}[ds\times r]$$

安培则从电流与电流之间的相互作用进行探讨，他把磁性归结为电流之间的相互作用，提出了“分子电流假说”，认为每个分子形成的圆形电流就相当于一根小磁针。

为了定量研究电流之间的相互作用，安培设计了四个极其精巧的实验，并在这些实验的基础上进行数学推导，得到普遍的电动力公式，为电动力学奠定了基础。这四个实验用的都是示零法，得到了精确可靠的结果。

第一个实验证明电流反向，作用力也反向。安培用一无定向秤检验对折的通电导线有无磁力作用。所谓无定向秤，实际上是两个方向相反的通电线圈（如图 3–5），悬吊在水银槽下。如果两个线圈受力不均衡，就会发生偏转。实验结果是：当对折导线通电时，无定向秤丝毫不动，证明强度相等、方向相反的两个靠得很近的电流对另一电流产生的吸力和斥力在绝对值上是相等的。

第二个实验证明磁作用的方向性。安培仍用无定向秤，将对折导线中的一根绕成螺旋状，（如图 3–6），结果也是没有作用，说明弯曲的电流和直线的电流是等效的，因此可以把弯曲电流看成是许多小段电流（即电流元）组成，它的作用就是各小段电流的矢量和。

■图 3–5 安培的无定向秤

（下方是一根对折导线）

■图 3–6 无定向秤实验之二

第三个实验研究作用力的方向。安培把圆弧形导体架在水银槽上，经水银槽通电（如图 3–7）。改变通电回路或用各种通电线圈对它作用，圆弧导体都不动，说明作用力一定垂直于载流导体。

第四个实验检验作用力与电流及距离的关系。安培用三个相似的线圈，（如图 3–8），其半径之比分别等于其距离之比。通电后，中间的线圈丝毫不动，说明第一个线圈和第三个线圈对第二个线圈的作用相互抵消。由此得出结论：载流导线的长度与作用距离增加相同倍数时，作用不变。

在这些实验的基础上，安培推出了普遍的电动力公式，即：两电流元之间的作用力为：

■图 3–7 圆弧导线受力方向

■图 3–8 三个线圈相互作用

$$F=\frac{i_1 i_2 ds_1 ds_2}{r^2}[\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cos\omega + k\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2]$$

其中θ_1、θ_2分别为电流元 i_1ds_1、i_2ds_2 与其联线的夹角，ω为电流元平面之间的夹角；k为一常数，后来安培确定$k=-\frac{1}{2}$。

这个公式为安培的电动力学提供了基础。值得注意的是，安培的电动力公式从形式上看，与牛顿的万有引力定律非常相似。安培正是遵循牛顿的路线，仿照力学的理论体系，创建了电动力学。他认定电流元之间的相互作用力是电磁现象的核心，电流元相当于力学中的质点，它们之间存在超距作用，就象万有引力一样。

§3.7 法拉第发现电磁感应

1820 年起，电磁热席卷欧洲，研究结果大量发表，众说纷纭，真伪难辨。

1821 年英国哲学学报（Annal of Philosophy）杂志编辑约法拉第写一篇关于电磁问题的述评，这件事导致法拉第开始了电磁学的研究。

法拉第当时正在英国皇家研究所做化学研究工作。他原来是文具店学徒工，从小热爱科学，奋发自学。由于化学家戴维的帮助，进到皇家研究所的实验室当了戴维的助手，1821 年受任为皇家研究所实验室主任。

法拉第在整理电磁学文献时，为了判断各种学说的真伪，亲自做了许多实验，其中包括奥斯特和安培的实验。在实验过程中他发现了一个新现象：如果在载流导线附近只有磁铁的一个极，磁铁就会围绕导线旋

转：反之，如果在磁极周围有载流导线，这导线也会绕磁极旋转，如图 3—9。这就是电磁旋转现象。

与此同时，法拉第对安培的“ 分子电流 ”理论提出不同看法。他设计了一个表演。取一支玻璃管，在上面缠以绝缘导线，做成螺线管，水平地半浸于水中。然后在水面上漂浮一只长磁针。按照安培的观点，载流螺线管对应于长条磁铁，螺线管的一端相当于南极，另一端相当北极。磁针如果是南极指着螺线管的北极，应该会吸向螺线管的北极并停于北极的一端。法拉第指出，这与实验结果不符。他做的实验是磁针的南极继续穿过螺线管，直至磁针的南极接近螺线管的南极。法拉第论证说，如果磁针是单极的，它就会沿磁力线无休止地运动下去，就象电磁旋转器那样。法拉第认为，和载流螺线管对应的不是实心磁体，而应是圆筒形磁铁。

■图 3–9 法拉第的电磁旋转器

安培则反驳说，圆筒形磁铁和螺线管并不一样。按照他的分子电流假设，圆筒形磁铁中的电流是一小圈一小圈，而线圈中的电流是沿着大圈的（如图 3–10）。为了证明圆筒形磁铁中的电流是互相抵消的，他当众作了一个表演：

把绝缘导线绕许多圈，做成线圈，在线圈内部放一个用薄铜片做成的圆环，取一磁棒置于圆环近旁，如果铜环里有宏观电流，磁棒就会驱使铜环偏转。否则，只可能有分子电流。安培的实验表明铜环里只有分子电流。

这是 1822 年的事。如果安培细心做下去，肯定会发现，在线圈通断电的瞬间，铜环里会出现宏观电流。遗憾的是安培一心只是想证明他的分子电流学说，竟错过了发现电磁感应的机会。

■空心磁体中的分子电流　螺线管中的宏观电流

图 3–10 安培的解释

据文献记载[①]，法拉第在知道安培的答辩后，也重复了这个实验。可惜他所依据的资料把安培的圆环误画为圆盘，所以法拉第重复了多次没有得到结果。

如果安培能更客观地对待实验，如果法拉第能准确地了解安培的实验，也许他们中的一位会比 1831 年早好几年发现电磁感应。

当然，法拉第发现电磁感应并不是偶然的机遇，而是他一贯追求科学真理的结果。他和奥斯特一样，笃信自然力的统一，早就在寻找“ 磁生电 ”的迹象了。

从 1824 年到 1828 年，法拉第多次进行电磁学实验。他仔细分析电流的磁效应，认为电流与磁的相互作用除了电流对磁、磁对磁、电流对

[①] L.P.Williams,Am.J.Phys.54(1986),p.306.

电流，还应有磁对电流的作用。他想，既然电荷可以感应周围的导体使之带电，磁铁可以感应铁质物体使之磁化，为什么电流不可以在周围导体中感应出电流来呢？于是他做了一系列实验，想寻找导体中的感应电流，其中有：

线圈接电池通电，一根导线置于线圈近旁，导线两端接电流计构成回路。结果在电流计中未发现感应电流。

令导线穿载流线圈而过，再接于电流计，也未发现感应电流。

再将导线绕成线圈置于载流线圈内，仍未发现感应电流……。

尽管“磁转化为电”的迹象还未找到，法拉第的信念始终没有动摇。他在实验日记里多次记录了不成功的尝试，顽强的意志跃于纸上。

1831 年 8 月 29 日，法拉第终于取得突破性进展。

这次他是用一个软铁圆环，环上绕两个互相绝缘的线圈 A 和 B，如图 3–11。法拉第在日记中写道[①]：

“使一个有 10 对极板，每板面积为 4 平方英寸的电池充电。用一根铜导线将一个线圈，或更确切地说把 B 边的线圈的两个端点联接，让铜线通过一个距离，恰好经过一根磁针的上方（距铁环 3 英尺远）。然后把电池联接在 A 边线圈的两端；这时立即观察到磁针的效应，它图 3–11 法拉第的电磁感应线振荡起来，最后又停在原先的位置圈上，一旦断开 A 边与电池的联结，磁针再次被扰动。”

■图 3–11 法拉第的电磁感应线圈

法拉第继续试验，注意到如果维持通电状态，磁针毫无反应。法拉第这才猛省，原来这类感应现象有特殊性，是和瞬间变化的过程联系在一起的。

接着，法拉第又做了一个实验。他取来一根铁棒，在铁棒上绕以线圈，再和电流计相接。铁棒两端各放一根磁棒，如图 3–12。当磁棒张合之际，电流计的磁针也不断摆动。

■图 3–12 法拉第又一个电磁感应实验

一个月后，法拉第对各项试验作了总结，向英国皇家学会报告说：产生感应电流的情况可以分为五类：1．变化中的电流；2．变化中的磁场；3．运动的稳恒电流；4．运动中的磁铁；5．运动中的导线。

法拉第只是定性地用文字表述了电磁感应现象。1833 年楞茨（Lenz）进一步发现楞茨定则，说明感应电流的方向。1845 年才由纽曼（F.E.Neumann，1798—1895）以定律的形式提出电磁感应的定量规律，即感应电动势为：

$$\varepsilon = -\int \frac{\partial A}{\partial t} dl$$

[①] Faraday ' sDiary,Bell,(1932)Vol.1,p.279.

其中A是纽曼最先提出的矢势函数：$A=\int \frac{i}{r}dl$。

法拉第对电磁学的贡献不仅是发现了电磁感应，他还发现了光磁效应（也叫法拉第效应）、电解定律和物质的抗磁性。他在大量实验的基础上创建了力线思想和场的概念，为麦克斯韦电磁场理论奠定了基础。

§3.8 电磁理论的两大学派

安培把自己的理论称为电动力学，这个理论的基础是电荷间的超距作用力。他的学说传到德国，形成了大陆派电动力学。纽曼和韦伯（Wilhelm Weber，1804—1891）是这个学派的代表。安培的电动力学能够说明许多电磁现象，并且能够严格地进行定量计算，因此受到人们的肯定。但是它还不能说明电磁感应，也没有包括库仑定律，对静电领域无能为力。1846 年韦伯继纽曼的电磁感应定律之后发展了安培的理论，他采纳了一年前费希纳（G.T.Fechner，1801—1887）提出的假说，把电流看成是由沿相反方向以相同速度运动的同样数量的正负电荷组成，在安培定律的基础上，提出了更一般的电作用力公式：

$$F=\frac{e_1e_2}{r^2}\left[1-\frac{1}{2c^2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+\frac{r}{c^2}\frac{d^2r}{dt^2}\right]$$

式中 e_1、e_2 表示两个电荷的电量，r 表示他们之间的距离，c 为一常数。这个公式的第一项表示静电力，可见它包括了库仑定律。进一步推导，可以引出安培定律和纽曼电磁感应公式。于是韦伯的电动力公式成了电动力学的基础。

但是，韦伯公式中包含了依赖于速度 $\frac{dr}{dt}$ 的力，所以屡遭反对。亥姆霍兹曾多次批评它不遵守能量守恒定律，大大影响了它的声誉。

与之对立的另有一学派，主张近距作用。法拉第就是其突出代表。高斯也曾企图把通过介质传递电作用的过程表示成数学公式，没有取得成功。1853 年，数学家黎曼（Bernard Riemann，1826—1866）曾用弹性以太模型说明电磁现象，提出了电力传播方程：

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}-a^2\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)+a^2\cdot 4\pi\rho=0$$

其中U是电势，ρ 是（x、y、z）点上的电荷密度，$a=\frac{1}{2}c$，c是光速。不过，他的论文发表于 1867 年，比麦克斯韦的电磁理论发表得还要晚。而麦克斯韦则继承了法拉第的力线思想，坚持近距作用，同时又正确地吸取了大陆派电动力学的成果。他就是在两种不同学说争论的背景下，创建了电磁场理论的。

§3.9 麦克斯韦电磁场理论的建立

3.9.1 法拉第的力线思想

法拉第从广泛的实验研究中构想出描绘电磁作用的“力线”图象。他认为电荷和磁极周围的空间充满了力线，靠力线（包括电力线和磁力线）将电荷（或磁极）联系在一起。力线就象是从电荷（或磁极）发出、又落到电荷（或磁极）的一根根皮筋一样，具有在长度方向力图收缩，在侧向力图扩张的趋势。他以丰富的想象力阐述电磁作用的本质。

法拉第研究了电介质对电力作用的影响，认识到这一影响表明电力不可能是超距作用，而是通过电介质状态的变化；即使没有电介质，空间也会产生某种变化，布满了力线。后来，法拉第又进一步研究了磁介质，解释了顺磁性和反磁性。电磁感应现象则解释为磁铁周围存在某种“电应力状态”（electro—tonic state），当导线在其附近运动时，受到应力作用而有电荷作定向运动；回路中产生电动势则是由于穿过回路的磁力线数目发生了变化。

法拉第的力线思想实际上就是场的观念，这是近距理论的核心内容。

3.9.2 W.汤姆生的类比研究

在法拉第力线思想的激励下，W.汤姆生对电磁作用的规律也进行过有益的尝试。他深感有必要把法拉第的力线思想翻译成数学公式，定量地作出表述，于是利用类比方法，从弹性理论和热传导理论得到借鉴。

法国科学家傅里叶在 1824 年发表《热的分析理论》（Theorieanalytique de la chaleur），详细地研究了在介质中热流的传播问题，建立了热传导方程。这本书对 W.汤姆生有很深的影响。

1842 年，W.汤姆生发表了第一篇关于热和电的数学论文，题为：《论热在均匀固体中的均匀运动及其与电的数学理论的联系》，他论述了热在均匀固体中的传导和法拉第电应力在均匀介质中传递这两种现象之间的相似性。他指出电的等势面对应于热的等温面，而电荷对应于热源。利用傅里叶的热分析方法，他把法拉第的力线思想和拉普拉斯、泊松等人已经建立的完整的静电理论结合在一起，初步形成了电磁作用的统一理论。

1847 年，W.汤姆生进一步研究了电磁现象与弹性现象的相似性，在题为《论电力、磁力和伽伐尼力的力学表征》一文中，以不可压缩流体的流线连续性为基础，论述了电磁现象和流体力学现象的共性。

W.汤姆生运用类比方法，把法拉第的力线思想转变为定量的表述，为麦克斯韦的工作提供了十分有益的经验。

3.9.3 麦克斯韦建立电磁场理论的第一步

麦克斯韦在电磁理论方面的工作可以和牛顿在力学理论方面的工作

相媲美。他和牛顿一样，是“站在巨人的肩上，”看得更深更远，作出了伟大的历史综合；他也和牛顿一样，其丰硕的成果是一步一步提炼出来的。

对于麦克斯韦来说，他是站在法拉第和 W.汤姆生这两位巨人的肩上。他面对众说纷纭的电磁理论，以深邃的洞察力开创了物理学的新领域。然而，他也不是一蹴而就的。他在创建电磁场理论的奋斗中作了三次飞跃，前后历程达十余年。

麦克斯韦是英国人，1831 年生于爱丁堡，自幼聪慧过人，得到了精心培养。10 岁进爱丁堡书院（Edinbergh Academy）学习。15 岁就有几何学论文发表。1850 年入剑桥大学，这时 W.汤姆生已是那里的研究员(fellow)。W.汤姆生比麦克斯韦大 7 岁，他们先后荣获数学竞赛优胜者称号。W.汤姆生对电磁理论的看法，麦克斯韦早有了解。在 W.汤姆生的影响下，麦克斯韦特别注意斯托克斯的工作，这为以后的研究作了准备。从 1855 年起，麦克斯韦学习电学，认真阅读了法拉第的著作，特别是《电学实验研究》一书。他大学刚毕业，就着手把法拉第的力线思想用数学分析方法进行表述。

W.汤姆生那两篇关于电磁相似性的论文对他很有影响。不但使他认识到类比方法的重要性，而且体验到法拉第的思想与传统的静电理论是协调的，有可能进一步建立统一的电磁理论。

1856 年，麦克斯韦发表了第一篇关于电磁理论的论文，题为：《论法拉第力线》。在这篇论文中，他发展了 W.汤姆生的类比方法，用不可压缩的流体的流线类比于法拉第的力线，把流线的数学表达式用到静电理论中。流线不会中断，力线也不会中断，只能发源于电荷或磁极，或者形成闭合曲线。麦克斯韦通过类比，明确了两类不同的概念，一类相当于流体中的力，E 和 H 就是；另一类相当于流体的流量，D 和 B 属于这一类。麦克斯韦进一步讨论了这两类量的性质。流量遵从连续性方程，可以沿曲面积分，而力则应线段积分。

关于类比方法，麦克斯韦写道[①]：

“为了采用某种物理理论而获得物理思想，我们应当了解物理相似性的存在。所谓物理相似性，我指的是在一门科学的定律和另一门科学的定律之间的局部类似。利用这种局部类似可以用其中之一说明其中之二。”麦克斯韦还特别注意到数学公式的类比。“精确科学的宗旨就是要把自然界的问题归结为通过数学计算来确定各个量。”

这篇论文的第二部分专门讨论法拉第的“电应力状态”，对电磁感应作了理论解释。麦克斯韦指出，纽曼的矢势 A 正是表示“电应力状态”的一个函数，两者是一致的。不过，纽曼的矢势是建立在超距作用上的

[①] Scientific Papers of J.C.Maxwell,Vol,1,Cambridge,1890,p.156.

数学函数，缺乏实际含意，而法拉第的“电应力状态”则是根据大量实验发现并认真作出的精湛假设。麦克斯韦写道：

“也许有人会认为，多种现象的定量观测还未严密到足以形成数学理论的基础，但是法拉第并不满足于简单地叙述其实验的数学结果，也不希望靠计算来发现定律。当他掌握住一个定律时，他立即象对纯粹数学的定律一样，毫不含糊地讲出来；如果数学家把这个定律当作物理真理接受下来，从它推出其它可以用实验检验的定律，这位数学家只不过起了帮助物理学家整理自己思想的作用。当然，也要承认这是科学推理的必要步骤。”

这里麦克斯韦提到的数学家实际上就是指他自己。

接着，麦克斯韦推出了 6 个定律：

“定律 I 沿面积元边界电应力强度的总和等于穿过该面积的磁感应或等于穿过该面积的磁力线总数，”用现代的符号表示，就是：

$$\oint A \cdot dl = \Phi$$

“定律 II 任一点的磁（场）强度经一组叫做传导方程的线性方程与磁感应相联系，”即

$$B = \mu H$$

“定律III沿任一面积边界的磁（场）强度等于穿过该面积的电流”，即

$$\oint H \cdot dl = \sum I$$

“定律IV电流的量与强度由一系列传导方程联系”，即

$$j = \sigma E$$

“定律 V 闭合电流的总电磁势等于电流之量与沿同一方向围绕电路的电应力强度的乘积”，即：电磁能等于电路中电流与感应所生磁通的乘积，

$$W = \oint j \cdot Adl$$

“定律VI任一导体元中的电动势等于该导体元上电应力强度的瞬时变化率”，即

$$\varepsilon = \frac{dA}{dt}$$

对于这 6 个定律，麦克斯韦写道：“在这 6 个定律中，我要表达的思想，我相信是（法拉第的）《电学实验研究》中所提示的思想模式的数学基础。”

3.9.4　麦克斯韦建立电磁场理论的第二步

隔了 5 年以后，麦克斯韦又回过来研究电磁理论，写了第二篇论文，题为《论物理力线》。内分四个部分，分别载于 1861 年和 1862 年的《哲学杂志》上。他的“目的是研究介质中的应力和运动的某些状态的力学效果，并将它们与观察到的电磁现象加以比较，从而为了解力线的实质

作准备。”两件事使麦克斯韦重新考虑他的研究方法：

一件是根据伯努利的流体力学，流线越密的地方压力越小，流速越快，而根据法拉第的力线思想，力线有纵向收缩、横向扩张的趋势，力线越密，应力越大，两者不宜类比。

另一件是电的运动和磁的运动也无法简单类比。从电解质现象中知道电的运动是平移运动，而从偏振光在透明晶体中旋转的现象看，磁的运动好象是介质中分子的旋转运动。

可见，电磁现象与流体力学现象有很大差别，电现象与磁现象不尽相同，靠几何上的类比无法洞察事物的本质。

于是麦克斯韦转向运用模型来建立假说。他借用兰金（W.J. M.Rankine）的“分子涡流”假设，提出自己的模型。他假设在磁场作用下的介质中，有规则地排列着许多分子涡旋，绕磁力线旋转，旋转角速度与磁场强度成正比，涡旋物质的密度正比于介质的磁导率。

这个模型很容易解释电荷间或磁场间的相互作用，并清晰地体现了近距作用。

但是在进一步解释变化电场或变化磁场之间的关系时又遇到了困难。分子涡旋在旋转中相邻的边界沿相反的方向运动，这怎么可能呢？麦克斯韦从一种惰轮机构中想出了解决方案。他假设在涡旋之间有一层细微的粒子，将各涡旋隔开。粒子非常小，可在原地滚动（图 3–13），电流就相当于粒子的移动。图中六角形代表分子涡旋，小圆圈代表粒子。当电流流过 AB 时，AB 上面一排涡旋 gh 按逆时针方向旋转，通过中间粒子的啮合作用，逐一地传到各层涡旋，使它们都按逆时针方向旋转。AB 下面的涡旋则按顺时针方向旋转。当 AB 中电流发生变化，例如突然停止时，gh 中的涡旋旋转受到障碍，如果这时 kl 排的涡旋仍维持原来的运转速度，则 pq 中的粒子层就会从 p 向 q 运动，也就是在 pq 中产生同向感应电流。这样就很好地解释了电磁感应。

■图 3–13 麦克斯韦的分子涡旋模型

就在讨论“应用于静电的分子涡旋理论”这个问题时，麦克斯韦抓住了要害。他假设分子涡旋具有弹性。当分子涡旋之间的粒子受电力作用产生位移时，给涡旋以切向力，使涡旋发生形变，反过来涡旋又给粒子以弹性力。当激发粒子的力撤去后，涡旋恢复原来的形状，粒子也返回原位。这样，带电体之间的力就归结为弹性形变在介质中储存的位能，而磁力则归结为储存的转动能。位移的变化形成了电流。麦克斯韦称之为“位移电流”，他写道：

“只要导体上有电动势作用，就会产生电流，电流遇到电阻，就会将电能转化为热。这一过程的逆向却不可能将热重新储存为电能。

---

① ScientifiePapersofJ.C.Maxwell,Vol,1,Cambridge,1890,p.491.

“电动势作用于电介质，会使电介质的一部分产生一种极化状态，有如铁的颗粒在磁体的影响下极化一样分布，并且和磁极化一样，可以看成是每个粒子以对立状态产生（电）极。

“在一个受到感应的电介质中，我们可以想象每个分子中的电都发生这样的位移，一端为正电，另一端为负电，而这些电仍然完全同分子联系在一起，不会从一个分子转移到另一个分子。

“这种作用对于整个电介质是沿某一方面产生了总的位移。这一位移并不形成电流，因为它达到一定值时就保持不变了。但当电流开始时，和当位移时增时减因而形成不断变化时，就会根据位移的增加或减少，形成沿正方向或负方向的电流。”

以 r 表示由于位移产生的电流值，h 表示位移值，麦克斯韦得出：

$$r = \frac{dh}{dt}，即 i_{位移} = \frac{dD}{dt}$$

麦克斯韦提出的“位移电流”的假设在电磁场理论中具有非常重要的地位。这是一个重大的突破，然而如果没有足够的胆略，是难以作出决断的，因为在这以前，甚至在麦克斯韦去世时（1879 年）还没有人做出过可靠的实验，证明位移电流的存在。

表明麦克斯韦的理论威力的还有一件事，就是预见光是起源于电磁现象的横波。

既然电介质中的粒子位移可以看成是电流，就可以把电流与磁力线的相互作用推广到绝缘体，甚至是充填于真空的以太。在这些介质中任一点产生的电粒子的振动，就可以通过相互作用在介质中扩展开去。

设弹性介质密度为 ρ，切变模量为 m，这种介质可以传播速度为 $v=\sqrt{\frac{m}{\rho}}$的横波。根据分子涡旋假设，麦克斯韦得到$v = D/\sqrt{\mu}$，其中E是取决于介质性质的一个特殊系数，μ为磁导率，对于真空或空气，μ=1。

柯尔劳胥（R.H.A. Kohlrausch，1809—1858）和 W.韦伯在 1857 年从莱顿瓶上测量电荷，根据静电单位和绝对单位的比值求出 E 值为：310740 千米/秒。麦克斯韦以它与斐索(Fizeau)1849 年用齿轮法测到的光速 c=315000 千米/秒比较，符合得很好。于是，麦克斯韦在论文中用斜体字写道：

“我们难以排除如下的推论：光是由引起电现象和磁现象的同一介质中的横波组成的。”3.9.5 麦克斯韦建立电磁场理论的第三步

1865 年麦克斯韦发表了关于电磁场理论的第三篇论文：《电磁场的动力学理论》（A dynamical theory of the electromagneticfield），全面地论述了电磁场理论。这时他已放弃分子涡旋的假设，然而他并没

[①] Scientific Papers of J.C.Maxwell,Vol,1,Cambridge,1890,p.500.

有放弃近距作用，而是把近距作用理论引向深入。

在这篇论文的引言中，他再次强调超距作用理论的困难，坚持假设电磁作用是由物体周围介质引起的。他明确地说[①]：

“我提出的理论可以称为电磁场理论，因为它必须涉及电体和磁体附近的空间，它也可以称为动力理论，因为它假设在这一空间存在着运动的物质，观测到的电磁现象正是这一运动物质引起的。”

接着，麦克斯韦全面阐述了电磁场的含意，他指出：“电磁场是包含和围绕着处于电或磁状态的物体的那部分空间，它可能充有任何一种物质”，“介质可以接收和贮存两类能量，即由于各部分运动的‘实际能’（按：即动能）和介质因弹性从位移恢复时要作功的‘位能’。”

然后，麦克斯韦讨论了电磁感应。他再次运用类比方法来说明电流的电磁动量（electromagnetic momentum），这个量代表了“电应力状态”，就是先前用过的矢势 A。

在这篇论文中，麦克斯韦提出了电磁场的普遍方程组，共 20 个方程，包括 20 个变量。

这 20 个变量是：电磁动量 F、G、H；磁力（即磁场强度）α、β、γ；电动热 P、Q、R；传导电流 p、q、r；电位移 f、g、h；全电流（包括位移的变化）p′、q′、r′；自由电荷电量 e；以及电位ψ。

20 个方程是：

电位移方程：

$$\left.\begin{aligned} p' &= p + \frac{df}{dt} \\ q' &= q + \frac{dg}{dt} \\ r' &= r + \frac{dh}{dt} \end{aligned}\right\} \qquad (A)$$

磁场力方程：

$$\left.\begin{aligned} \mu\alpha &= \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz} \\ \mu\beta &= \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx} \\ \mu\gamma &= \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy} \end{aligned}\right\} \qquad (B)$$

电流方程：

[①] Scientific Papers of J.C.Mawell，Vol,1,Cambridge,1890,p.527.

$$\left.\begin{aligned}\frac{d\gamma}{dy}-\frac{d\beta}{dz}&=4\pi p'\\ \frac{d\alpha}{dz}-\frac{d\gamma}{dx}&=4\pi q'\\ \frac{d\beta}{dx}-\frac{d\alpha}{dy}&=4\pi r'\end{aligned}\right\} \qquad (C)$$

电动势方程：

$$\left.\begin{aligned}P&=\mu\left(\gamma\frac{dy}{dt}-\beta\frac{dz}{dt}\right)-\frac{dF}{dt}-\frac{d\varphi}{dx}\\ Q&=\mu\left(\alpha\frac{dz}{dt}-\gamma\frac{dx}{dt}\right)-\frac{dG}{dt}-\frac{d\varphi}{dy}\\ R&=\mu\left(\beta\frac{dx}{dt}-\alpha\frac{dy}{dt}\right)-\frac{dH}{dt}-\frac{d\varphi}{dz}\end{aligned}\right\} \qquad (D)$$

电弹性方程：

$$\left.\begin{aligned}p&=kf\\ Q&=kg\\ R&=kh\end{aligned}\right\} \qquad (E)$$

电阻方程：

$$\left.\begin{aligned}p&=-\rho p\\ Q&=-\rho q\\ R&=-\rho r\end{aligned}\right\} \qquad (F)$$

自由电荷方程：

$$e+\frac{df}{dx}+\frac{dg}{dy}+\frac{dh}{dz}=0 \qquad (G)$$

连续性方程：

$$\frac{de}{dt}+\frac{dp}{dx}+\frac{dq}{dy}+\frac{dr}{dz}=0 \qquad (H)$$

实际相当于 8 个方程，其中 6 个是矢量方程，用现代符号表示，就是：

$$C=i+\frac{\partial D}{\partial t} \qquad (A)$$

$$\mu H=\mathrm{curl}A \qquad (B)$$

$$\mathrm{curl}H=4\pi C \qquad (C)$$

$$E=\mu(v\times H)-\frac{\partial A}{\partial t}-\nabla\varphi \qquad (D)$$

$$E=kD \qquad (E)$$

$$E=-\rho i \qquad (F)$$

直到 1890 年，赫兹才给出简化的对称形式，整个方程组只包括四个矢量方程，一直沿用至今：

$$\mathrm{div}E = 4\pi\rho$$
$$\mathrm{div}B = 0$$
$$\mathrm{curl}B = \frac{1}{c}\quad\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}j$$
$$\mathrm{curl}E = -\frac{1}{c}\frac{\partial B}{\partial t}$$

从电磁场理论的建立过程，我们又一次领会到壮伟的物理大厦是怎样一层一层地修筑起来的。

麦克斯韦生在电磁学已经打好基础的年代，他没有辜负时代的要求，及时地总结了已有的成就；他受到法拉第力线思想的鼓舞，又得到W.汤姆生类比研究的启发；他深刻地洞察了以纽曼和韦伯为代表的大陆派电动力学的困难和不协调因素，看穿那种力图把电磁现象归结于力学体系的超距作用理论的根本弱点，决心致力于近距作用理论。他从类比研究入手，开始只是借用适当的数学工具定量地表述法拉第的力线图象。后来，他感到有必要对力线的分布及其应力性质给予机理性的说明，乃转而运用模型理论。在这个过程中，他敏锐地抓住了位移电流和电磁波这两个关键概念。最后，他终于甩掉一切机械论点，径直把电磁场作为客体摆在电磁理论的核心地位，从而开创了物理学又一个新的起点。对麦克斯韦的功绩，爱因斯坦作了很高的评价，他在纪念麦克斯韦 100 周年的文集中写道[①]：

“自从牛顿奠定理论物理学的基础以来，物理学的公理基础的最伟大的变革，是由法拉第和麦克斯韦在电磁现象方面的工作所引起的”。“这样一次伟大的变革是同法拉第、麦克斯韦和赫兹的名字永远联在一起的。这次革命的最大部分出自麦克斯韦。”

[①] 许良英等编译，爱因斯坦文集，第一卷，商务印书馆，1977 年，p.292.

第四章　光学的发展

§4.1　历史概述

光学的起源也和力学、热学一样，可以追溯到二、三千年前。我国的《墨经》就记载了许多光学现象，例如投影、小孔成像、平面镜、凸面镜、凹面镜等等。西方也很早就有光学知识的记载，欧儿里得（Euclid，公元前约 330—260）的《反射光学》（Catoptrica）研究了光的反射，阿拉伯学者阿勒·哈增（Al–Hazen，965～1038）写过一部《光学全书》，讨论了许多光学现象。

光学真正形成一门科学，应该从建立反射定律和折射定律的时代算起，这两个定律奠定了几何光学的基础。

光的本性也是光学研究的重要课题。微粒说把光看成是由微粒组成，认为这些微粒按力学规律沿直线飞行，因此光具有直线传播的性质。19 世纪以前，微粒说比较盛行。但是，随着光学研究的深入，人们发现了许多不能用直进性解释的现象，例如干涉、衍射等，用光的波动性就很容易解释，于是光的波动说又占了上风。两种学说的争论构成了光学发展史中的一根红线。

§4.2　折射定律的建立

折射现象发现得很早，折射定律却几经沧桑，经过漫长的岁月才得以确立。

早在古希腊时代，天文学家托勒密（约 100～170），曾专门做过光的折射实验。他写有《光学》5 卷，可惜原著早已失传。从残留下来的资料可知，在那部书中记有折射实验和他得到的结果：折射角与入射角成正比。

大约过了一千年，阿勒·哈增发现托勒密的结论与事实不符。他认识到入射线、反射线和反光镜的法线总是在同一平面，入射线与反射线各处于法线的一侧。

1611 年，开普勒在系统研究的基础上，写了《折光学》一书，书中记载他做了两个实验。

第一个实验是比较入射角和折射角。他设计的装置如图 4–1，日光 LMN 斜射到器壁 DBC 上，BC 边缘的影子投射到底座，形成阴影边缘 HK。另一部分从 DB 射进一玻璃立方体 ADBEF 内，阴影的边缘形成于 IG。根据屏高 BE 和两阴影的长度 EH 和 EG，就可算出玻璃立方体的入射角和出射角之比。

■图 4–1 开普勒比较入射角和出射角的实验装置

开普勒的第二个实验是用一圆柱形玻璃块（如图 4–2）。令太阳光垂直于圆柱长轴入射，可以观测到，通过圆柱长轴的光线 S_1 方向不变，和圆柱边缘相切的光线 S_2 偏折最大。开普勒发现，最大偏折角 β 大约为 42°。

开普勒虽然没有找到正确的折射定律表达式，但通过这些实验发现了全反射。他是这样思考的：

令 GG 为玻璃与空气的分界面，如图 4–3。光线从玻璃上方的空气由各个方向都经 O 点进入玻璃，这些光线必将组成夹角为 2×42°=84°的锥形 MOM。他进一步设想，如果从玻璃有一束光 Σ 射向界面，其入射角大于 42°，则到达 O 点后，既不能进入空气，也不能进入 MOM 锥形区域，必定反射为 Σ′。

■图 4–2 开普勒的圆柱玻璃实验

■图 4–3 开普勒通过此图发现全反射

开普勒的论证方法很巧妙，他利用光的可逆性，从反面倒推得出结论。这是科学论证中常用的一种很有说服力的方法。

折射定律的正确表述是荷兰的斯涅耳（W．Snell，1580—1626）在 1621 年从实验得到的。实验方法跟开普勒基本相同。斯涅耳发现，比值 OS′/OS（图 4–4）恒为常数，由此导出：

$$\frac{OS'}{OS}=\frac{\csc\beta}{\csc\alpha}=\text{const}.$$

■图 4–4 期涅耳的折射实验

斯涅耳在世时并没有发表这一结果。1626 年，他的遗稿被惠更斯读到后才正式发表。

笛卡儿不久也推导出了同一结果，他用图 4–5 说明自己的思想。在他的名著《方法论》（1637 年）中有一附录，也叫《屈光学》，其中写道[①]：

■图 4–5 迪卡儿说明折射用图

“首先，设想球从 A 被击向 B（图 4–5），打到 B 点，CBE 不是地面，而是薄脆的布，球穿过布，只损失了部分速度，例如损失了一半。我们假设过，为了确定它的路径，……运动的趋势可看成是由两部分组成，其中只有从上而下的运动因与布相碰而必有变化，至于那向右运动的趋势，则总与过去一样，因为布并没有在这个方向与球相碰。我们再从中心 B 画圆 AFD，作三条直线 AC、HB、FE，各与 CBE 成直角，并要求 FE 与 HB 之间的距离为 HB 与 AC 之间的距离的两倍。于是我们看到，球应该向 I 点运动。因为，既然球在穿过布时失去了一半速度，那么它从 B 下落到圆周 AFD 上某一点所需时间，应等于 A 到 B 的两倍，而向右的运动趋势

[①] 转引自：W.F.Magie,Source Book in Physcis,MeGraw-Hill,1935,p.267.

并无损失，所以在两倍时间内通过的距离应等于 AC 到 HB 的两倍，结果应在同一时刻达到 FE 线上的某一点。只有到达 I 点，其它任何点都不可能，因为在布 CBE 之下，只有 I 点是圆 AFD 和直线 FE 的交点。”

从笛卡儿这一段说明可以看出：

1．他用球的运动来阐述光的折射，而球的运动服从力学规律。可见，他采用的是微粒说。

2．他假设光在两种媒质中的速度不一样，把折射现象归因于光速不同。

3．他假设平行于媒质交界面的光速分量不变。由此可以推出折射定律：

设图 4–5 中光在上层媒质的速度为 v_i，入射角∠ABH 为 i；光在下层媒质的速度为 v_r，折射角∠IBG 为 r，则：

$$v_i \sin i = v_r \sin r，\therefore \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_r}{v_i}$$

由此得：$\frac{\sin i}{\sin r} =$ 常数

这正是折射定律的正弦表达式。但是笛卡儿的推导是基于媒质交界面两侧光速的平行分量相等的假设。为了使理论结果与实验数据相符，他必须假设密媒质光速比疏媒质大。

笛卡儿的推导受到了他的同国人费马（Pierr Fermat，1601—1665）的批评。1661 年，费马把数学家赫里贡（Herigone）提出的数学方法用于折射问题，推出了折射定律，得到了正确的结论。这就是著名的最短时间原理，用现代的数学语言可表述为：假设图 4–6 中上层为疏
媒质，光速为 v_i，下层为密媒质，光速为 v_r，光从 C 到达 I 所需时间为：

$$\frac{CD}{v_i} + \frac{DI}{v_r} \text{ 令 } FD = x，FH = e，\text{则} \frac{CD}{v_i} + \frac{DI}{v_r} = \frac{\sqrt{CF^2 + x^2}}{v_i} + \frac{\sqrt{HI^2 + (e - x)^2}}{v_i}$$

$$= \text{最小值} = M \text{ 将上式对 } x \text{ 微分 } \frac{dM}{dx} = 0$$

即得：$\frac{\sin i}{v_i} - \frac{\sin r}{v_r} = 0$

由此得：$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_i}{v_r}$

用费马的话说[①]，就是：“线 DF 与 DH 之比等于密媒质的阻力与疏媒质的阻力之比”，而且，“光线从疏媒质进入密媒质，会转向垂线。”于是，费马得到了正确的结论，并为折射定律提供了严格准确的证明。

■图 4–6 费马推导折射定律用图

折射定律的确立是光学发展史中的一件大事。它的研究由于天文学

[①] 转引自：W.F.Magie,SourceBookinPhyscis，MeGraw-Hill,1935,p.279.

的迫切要求而受到推动，因为天文观测总是会受大气折射的影响，后来又加上光学仪器制造的需要，所以到了 17 世纪，许多物理学家都致力于研究折射现象。一经建立起折射定律，几何光学理论很快得到了发展。

§4.3 牛顿研究光的色散

牛顿是一位科学巨匠。他不仅在力学上有伟大的成就，在数学、天文学、化学以至光学上都有杰出的贡献。单就光学方面的工作，就足以被后人敬为科学上的伟人。和力学方面的综合工作不同，牛顿在光学方面的工作多是奠基性的实验研究，其中尤以色散的研究最为突出。

4.3.1 色散现象的早期研究

色散也是一个古老的课题，最引人注目的是彩虹现象。早在 13 世纪，科学家就对彩虹的成因进行了探讨。德国有一位传教士叫西奥多里克（Theodoric），曾在实验中模仿天上的彩虹。他用阳光照射装满水的大玻璃球壳，观察到了和空中一样的彩虹，以此说明彩虹是由于空气中水珠反射和折射阳光造成的现象。不过，他的进一步解释没有摆脱亚里士多德的教义，继续认为各种颜色的产生是由于光受到不同阻滞所引起。光的四种颜色：红、黄、绿、蓝，处于白与黑之间，红色接近白色，比较明亮，蓝色接近黑色，比较昏暗。阳光进入媒质（例如水），从表面区域折射回来的是红色或黄色，从深部折射回来的是绿色或蓝色。雨后天空中充满水珠，阳光进入水珠再折射回来，人们就看到色彩嫔纷的景象。

笛卡儿对彩虹现象也有兴趣，他用实验检验西奥多里克的论述。在他的《方法论》（1637 年）中还有一篇附录，专门讨论彩虹，并且介绍了他自己做过的棱镜实验，如图 4–7。他用三棱镜将阳光折射后投在屏上，发现彩色的产生并不是由于进入媒质深浅不同所造成。因为不论光照在棱镜的那一部位，折射后屏上的图象都是一样的。遗憾的是，笛卡儿的屏离棱镜太近（大概只有几厘米），他没有看到色散后的整个光谱，只注意到光带的两侧分别呈现蓝色和红色。

■图 4–7 笛卡儿的棱镜实验

1648 年，布拉格的马尔西用三棱镜演示色散成功。不过他解释错了。他认为红色是浓缩了的光，蓝色是稀释了的光；之所以会出现五颜六色，是由于光受物质的不同作用，因而呈现各种不同的颜色。

17 世纪正当望远镜、显微镜问世，伽利略运用望远镜观察天体星辰，胡克用显微镜观察微小物体，激起了广大科学界的兴趣。然而，当放大倍数增大时，这些仪器不可避免地都会出现象差和色差，使人们深感迷惑。人们不理解，为什么在图象的边缘总会出现颜色？这和彩虹有没有共同之处？这类现象有什么规律性？怎样才能消除？

这时，牛顿正在英国剑桥大学学习。他的老师中有一位数学教授名叫巴罗（Isaac Barrow，1630—1677），对光学很有研究。牛顿听过他讲光学，还帮他编写《光学讲义》。牛顿很喜欢做光学实验，还亲自动手磨制透镜，想按自己的设计装配出没有色差的显微镜和望远镜。这个愿望激励他对光和颜色的本性进行深入的探讨。

4.3.2 牛顿对色散现象的思考

牛顿从笛卡儿等人的著作中得到许多启示。例如笛卡儿说过："运动慢的光线比运动快的光线折射得更厉害，"胡克描述过肥皂泡的颜色变化，认为不同的颜色是光脉冲对视网膜留下的不同印象。红色和蓝色是原色，其它颜色都是由这两种颜色合成和冲淡而成。牛顿注意到这些说法的合理成分，同时也提出许多疑问。在牛顿留下的手稿中，记录了许多当年的疑问和思考，例如，他问道[①]：

如果光是脉冲，为什么不像声音那样在传播中偏离直线？

为什么弱的脉冲比强的脉冲运动快？

为什么水比水蒸汽更清晰？

为什么煤是黑的，煤烧成的灰反而是白的？

牛顿不满意前人（包括他的老师）对光现象的解释，就自己动手做起了一系列实验。

4.3.3 牛顿的色散实验

牛顿从笛卡儿的棱镜实验得到启发，又借鉴于胡克和玻意耳的分光实验。胡克用了一只充满水的烧瓶代替棱镜，屏距折射位置大约 60 厘米，玻意耳把棱镜散射的光投到 1 米多高的天花板上，而牛顿则将距离扩展为 6—7 米，从室外经洞口进入的阳光经过三棱镜后直接投射到对面的墙上。这样，他就获得了展开的光谱，而前面的几位实验者只看到两侧带颜色的光斑。牛顿高明之处就在于他已经意识到了不同颜色的光具有不同的折射性能，只有拉长距离才能分解开不同折射角的光线。

为了证明红光和蓝光各具不同的折射性能，牛顿用棱镜做了如下的实验。

如图 4–8，在一张黑纸上画一条线 opq，半边 op 为深蓝色，半边 pq 为深红色，经棱镜 adf 观看，只见这根线好象折断了似的，分界处正是红蓝之交，蓝色部分 rs 比红色部分 st 更靠近棱脊 ab。可见蓝光比红光受到更大的折射。

为了证明色散现象不是由于棱镜跟阳光的相互作用，也不是由于其它原因，而是由于不同颜色具有不同的折射性，牛顿又做了一个实验。

■图 4–8 牛顿证明蓝光比红光折射性强

[①] T.E.Mc Guire and M.Tamny, Certain Philosophical Questions:Newton＇s Trinity Notebook, Cambridge, 1983, p.241.

他拿三个棱镜做实验，三个棱镜完全相同，只是放置方式不一样，如图 4–9。倘若颜色的分散是由于棱镜的不平或其它偶然的不规则性，那么第二个棱镜和第三个棱镜就会增加这一分散性。可是实验结果是，原来分散的各射性强种颜色，经过第二个棱镜后又还原成白光，形状和原来一样。再经过第三个棱镜，又分解成各种颜色。由此证明，棱镜的作用是使白光分解为不同成分，又可使不同成分合成为白光。

■图 4–9 牛顿用三个棱镜做实验

牛顿这一科学论断和当时已流传上千年的观念是格格不入的。他预料会遭到科学界的反对，于是又做了一个很有说服力的实验。牛顿把这个实验称为“判决性实验”，如图 4–10。

他拿两块木板，一块 DE 放在窗口 F 紧贴棱镜 ABC 处，光从 S 平行进入 F 后经棱镜折射穿过小孔 G，各种颜色以不同的角度射向另一块木板 de。de 离 DE 约 4 米远，板上也开有小孔 g，在 g 后面也放有一块三棱镜 abc，使穿过的光再折射后抵达墙壁 MN。牛顿手持第一块棱镜 ABC，缓缓绕其轴旋转，这样使第二块木板上的不同颜色的光相继穿 g 到达三棱镜 abc。实验结果是：被第一块棱镜折射得最厉害的紫光，经第二块棱镜也偏折得最多。由此可见，白光确是由折射性能不同的光组成。

■图 4–10 牛顿的判决性实验

在色散实验的基础上，牛顿总结出了几条规律，即：

1．光线随其折射率不同，色也不同。色不是光的变态，而是光线原来的、固有的属性。

2．同一色属于同一折射率，不同的色，折射率不同。

3．色的种类和折射的程度是光线所固有的，不会因折射、反射或其它任何原因而改变。

4．必须区分两种颜色，一种是原始的、单纯的色，另一种是由原始的颜色复合而成的色。

5．本身是白色的光线是没有的，白色是由所有色的光线按适当比例混合而成。

6．由此可解释棱镜形成各种色的现象及彩虹的形成。

7．自然物体的色是由于对某种光的反射大于其它光反射的缘故。

8．把光看成实体有充分根据。

牛顿的这些结论相当全面，而且论据充分。但是当时人们难以接受，因为这涉及到中世纪以来关于光的本性的种种争论。牛顿对这个问题并没有作出判决，但是他的结论与光的本性密切相关。牛顿关于光和颜色的理论对当时人们来说实在太新奇了，怀疑和攻击不断对牛顿袭来。有人认为牛顿的光谱实验没有考虑到太阳本身的张角，有人主张光谱变长是一种衍射效应，还有人提出可能是天空中云彩的反映。胡克对牛顿挑剔得最厉害，他认为牛顿的实验不具判决性，用别的理论也可说明，而

牛顿的理论无法解释薄膜的颜色。

为此，牛顿在几年后又做了一个实验。他取一只长而扁的三棱镜，使它产生的光谱相当狭窄。用屏放在位置 1 接受光，看到的仍然是普通光，但将屏改变角度，放在位置 2，就可以看到分解的光谱。这样，由于只涉及屏的角度，结果与棱镜无关，就回答了怀疑者提出的质疑。

■图 4–11 扁长三棱镜实验

牛顿的光学研究具有独特的风格，他在光学领域中的成就集中反映在 1704 年出版的《光学》一书中[①]。该书的副标题是：《关于光的反射、折射、拐折和颜色的论文》。全书共分三编，棱镜光谱实验收集在第一编中。正像牛顿在该书开始所说的："我的计划不是用假设来解释光的性质，而是用推理和实验来提出并证明这些性质。"在第一编中，牛顿共提出 19 个命题，33 个实验，他以大量篇幅详细描述实验装置、实验方法和观测结果。牛顿有一句名言："不作虚假的假设"（hypotheses non fingo）。他的光学研究正是从实验和观察出发，进行归纳综合，总结出一套完整的科学的理论。归纳法是科学研究的重要方法之一（当然不是唯一的方法），牛顿对色散的研究为后人树立了光辉的样板。

牛顿很善于总结科学研究方法，他在论述自己的方法时写道[①]：

"在自然科学里，应该象在数学里一样，在研究困难的事物时，总是应当先用分析的方法，然后才用综合的方法。这种分析方法包括做实验和观察，用归纳法去从中作出普遍结论，并且不使这些结论遭到异议，除非这些异议来自实验或者其他可靠的真理方面。因为在实验哲学中是不应该考虑什么假说的。虽然用归纳法来从实验和观察中进行论证不能算是普遍的结论，但它是事物的本性所许可的最好的论证方法，并且随着归纳的越为普遍，这种论证看来也越为有力。如果在许多现象中没有出现例外，那么可以说，结论就是普遍的。但是如果以后在任何时候从实验中发现了例外，那时就可以说明有这样或那样的例外存在。用这样的分析方法，我们就可以从复合物论证到它们的成分，从运动到产生运动的力。一般地说，从结果到原因，从特殊原因到普遍原理，一直论证到最普遍的原因为止，这就是分析的方法；而综合的方法则假定原因已经找到，并且已把它们立为原理，再用这些原理去解释由它们发生的现象，并证明这些解释的正确性。"

§4.4 光的微粒说和波动说

什么是光？光的本性是什么？它由什么组成？每一位研究光学现象

[①] I．Newton,Opticks,Bell,1931.

[①] H．S．塞耶编，牛顿自然哲学著作选，上海人民出版社，1974 年，第 212 页。

的物理学家都必然会涉及这些问题。从折射定律和色散现象的研究也可看出这一点。

笛卡儿主张波动说，他认为光本质上是一种压力，在完全弹性的、充满一切空间的媒质（以太）中传递，传递的速度无限大。但他却又用小球的运动来解释光的反射和折射。牛顿倾向于微粒说，认为光可能是微粒流，这些微粒从光源飞出，在真空或均匀媒质中作惯性运动，但他在研究牛顿环时，却认识到了光的周期性，使他把微粒说和以太振动的思想结合起来，对干涉条纹作出了自己的解释。可见，不论是笛卡儿还是牛顿，都没有对光的本性作出肯定的判断。

4.4.1 早期的波动说

胡克明确主张光是一种振动，并根据云母片的薄膜干涉现象

作出判断，认为光是类似水波的某种快速脉冲。在 1667 年出版的《显微术》一书中，他写道[①]：

“在均匀媒质中，这种运动在各个方向都以同一速度传播，所以发光体的每个脉冲或振动都必然会形成一个球面。这个球面不断扩大，就如同把石块投进水中在水面一点周围的波或环，膨胀为越来越大的圆环一样（尽管要快得多）。由此可见，在均匀媒质中激起的这些球面的所有部分都与射线以直角相交。”

荷兰物理学家惠更斯发展了胡克的思想。他进一步提出光是发光体中微小粒子的振动在弥漫于宇宙空间的以太中的传播过程。光的传播方式与声音类似，而不是微粒说所设想的像子弹或箭那样的运动。1678 年他向巴黎的法国科学院报告了自己的论点（当时惠更斯正留居巴黎），并于 1690 年取名《光论》（Traite de laLumiere）正式发表。他写道[①]：

“假如注意到光线向各个方向以极高的速度传播，以及光线从不同的地点甚至是完全相反的地方发出时，其射线在传播中一条穿过另一条而互相毫无影响，就完全可以明白：当我们看到发光的物体时，决不会是由于这个物体发出的物质迁移所引起，就象穿过空气的子弹或箭那样。”

罗迈（Olaf Roemer，1644—1710）在 1676 年根据木星卫蚀的推迟得到光速有限的结论，使惠更斯大受启发。罗迈观测到当地球行至太阳和木星之间时，木卫蚀提早 7—8 分钟，而当地球行至太阳的另一侧时，木卫蚀却推迟 7—8 分钟。由此推算光穿越地球轨道约需 22 分钟。惠更斯根据罗迈的数据和地球轨道直径计算出光速 $C=2\times10^8$ 米／秒。这个结果虽然尚欠精确，却是第一次得到的光速值。于是惠更斯设想传播光的

[①] 转引自：E.Whittaker,A History of the Theories Aether and Electricity,Vol. 1, Nelson, 1951, pp14—15．

[①] 转引自：П．С．Кубрявцев，ИсторияФизики，Т.1，Учпедгиз，1956，pp．220—221．

以太粒子非常之硬，有极好的弹性，光的传播就象振动沿着一排互相衔接的钢球传递一样，当第一个球受到碰撞，碰撞运动就会以极快的速度传到最后一个球。图 4–12 就是惠更斯自己画的一幅示意图。他认为，以太波的传播不是以太粒子本身的远距离移动，而是振动的传播。惠更斯接着写道：

■图 4–12 惠更斯的光波示意图

“我们可以设想，以太物质具有弹性，以太粒子不论受到推斥是强还是弱都有相同的快速恢复的性能，所以光总以相同的速度传播。”

图 4–13 是惠更斯描绘光波的示意图。这样，惠更斯就明确地论证了光是波动（他认为是以太纵波），并进而以光速的有限性推断光和声波一样必以球面波传播。接着，惠更斯运用子波和波阵面的概念，引进了一个重要原理，这就是著名的惠更斯原理。他写道[①]：

■图 4–13 惠更斯描绘光波的示意图

“关于波的辐射，还要作进一步考虑，即传递波的每一个物质粒子，不仅将运动传给从发光点开始所画直线上的下一个粒子，而且还要传给与之接触的并与其运动相对抗的其他一切粒子。结果是，在每个粒子的周围，兴起了以该粒子为中心的波。所以，（如图 4–14），设 DCF 是从发光点 A 发出的并以该点为中心的波，则在球面 DCF 内的一个粒子 B，将产生自己独有的波（按：即子波）KCL，与这个波在 C 点触及波 DCF 的同时，从 A 点发出的主波也到达 DCF。显然，波 KCL 与波 DCF 的唯一接触点是在 AB 直线上，即 C 点。球面 DCF 内的其他点 bb、dd 等等也将类似地产生各自的波。每个这样的波与波 DCF 相比虽然都无限微弱，但所有这些波距 A 点最远的那部分表面却组成了波 DCF（按：即波阵面）。”

■图 4–14 惠更斯原理示意图

接着，惠更斯用他的原理说明了光的反射和折射。从他的理论可以推出与笛卡儿不同的折射公式：

$$\frac{\sin i}{\sin r}=\frac{v_i}{v_r}$$

1669 年丹麦的巴塞林纳斯（Erasmus Bartholinus，1625—1698）发现了双折射现象。当他用方解石（也叫冰洲石）观察物体时，注意到有双像显示。经过反复试验，他确定是这种晶体对光有两种折射：寻常折射和非寻常折射。

这是继干涉、衍射之后发现的又一光学新现象。对于这种新现象，是否能作出合理的解释，自然是微粒理论和波动理论面临的考验。惠更斯在得知巴塞林纳斯的发现后，立即重复进行了实验。他证实了这一现象，并且观察到在其他晶体，例如石英，也有类似效应，只是效果差些。

[①] 原载 C. Huygens, Treatise, pp.19—20，此处转引自：A.E.Shapiro, Arch.Hist. Exa．Sci.,11（1973）P.222.

进一步他还确定寻常折射仍然遵守折射定律，非寻常折射则不遵守折射定律。至于双折射现象的解释，惠更斯很巧妙地提出了椭球波的设想，认为方解石等晶体的颗粒可能具有特殊形状，以至光波通过时，在某一方向比在另一方向传播得更快一些，于是就出现了不同的折射。

惠更斯发展了波动理论。但是由于他把光看成象声波一类的纵波，因此不能解释偏振现象。他的波动理论也不能解释干涉和衍射现象，因为那时还没有建立周期性和位相等概念。

早期的波动理论缺乏数学基础，还很不完善，而牛顿力学正节节胜利。以符合力学规律的粒子行为来描述光学现象，被认为是唯一合理的理论，因此，直到 18 世纪末，占统治地位的依然是微粒学说。

4.4.2 托马斯·杨的研究

托马斯·杨（Thomas Young，1773—1829）是英国人，从小聪慧过人，博览群书，多才多艺，17 岁时就已精读过牛顿的力学和光学著作。他是医生，但对物理学也有很深造诣，在学医时，研究过眼睛的构造和其光学特性。就是在涉及眼睛接受不同颜色的光这一类问题时，对光的波动性有了进一步认识，导致他对牛顿做过的光学实验和有关学说进行深入的思考和审查。1801 年，托马斯·杨发展了惠更斯的波动理论，成功地解释了干涉现象。图 4–15 是他在论文中用于说明干涉现象的插图。他是这样阐述他的干涉原理的[①]：

■图 4–15 托马斯·杨解释干涉现象用图

“当同一束光的两部分从不同的路径，精确地或者非常接近地沿同一方向进入人眼，则在光线的路程差是某一长度的整数倍处，光将最强，而在干涉区之间的中间带则最弱，这一长度对于不同颜色的光是不同的。”

托马斯·杨明确指出，要使两部分光的作用叠加，必须是发自同一光源。这是他用实验成功地演示干涉现象的关键。许多人想尝试这类实验往往都因用的是两个不同的光源而失败。

在 1807 年托马斯·杨的论文中描述了他的双缝实验，他写道：

“使一束单色光照射一块屏，屏上面开有两个小洞或狭缝，可认为这两个洞或缝就是光的发散中心，光通过它们向各个方向绕射。在这种情况下，当新形成的两束光射到一个放置在它们前进方向上的屏上时，就会形成宽度近于相等的若干条暗带。……图形的中心则总是亮的。”

“比较各次实验，看来空气中极红端的波的宽度约为三万六千分之一英寸，而极紫端则为六万分之一英寸。”所谓“波的宽度”，就是波长，这些结果与近代的精确值近似相等。

[①] 转引自：Concise Dictionary of Scientific Biography, Charles Scribner′s Sons, 1981, p.744.

[①] 转引自：W.F.Magie,SourceBookinPhysics,MeGraw-Hill,1935,pp.310—311.

双缝干涉实验为托马斯·杨的波动学说提供了很好的证据，这对长期与牛顿的名字连在一起的微粒说是严重的挑战。托马斯·杨说得好[②]：“尽管我仰慕牛顿的大名，但我并不因此非得认为他是百无一失的。我……遗憾地看到他也会弄错，而他的权威也许有时甚至阻碍了科学的进步。”

果然，托马斯·杨由于提出干涉原理而受到当时一些权威学者的围攻，其中有一位以牛顿学术权威自居的布劳安（HenryBrougham）攻击得最为刻薄，说托马斯·杨的文章“没有任何价值”，“称不上是实验”，干涉原理是“荒唐”和“不合逻辑”的，等等。一二十年间，竟没有人理解托马斯·杨的工作。据说，托马斯·杨为回驳布劳安专门撰写的论文竟无处发表，只好印成小册子，小册子出版后，“只卖出了一本”。

1809 年，法国的马吕斯（Etienne Louis Malus， 1775—1812）发现偏振现象，并认为找到了决定性的证据，证明光的波动理论与事实矛盾。然而，托马斯·杨面对困难并没有动摇自己的科学信念，他写信给马吕斯说[①]：“您的实验证明了我采用的理论（即干涉理论）有不足之处，但是这些实验并没有证明它是虚伪的。”经过几年的研究，托马斯·杨逐渐领悟到要用横波的概念来代替纵波,而这正是菲涅耳(Augustin Jean Fresnel， 1788—1827）继续发展波动理论的出发点。

4.4.3 菲涅耳的贡献

菲涅耳是法国的一位工程师，对光学很感兴趣，曾发明一种用于灯塔的螺纹透镜，人称菲涅耳透镜。他精通数学，因此有条件在光学的数学理论方面作出特殊的贡献。1817 年 1 月 12 日，托马斯·杨写信给阿拉果，告诉他已找到了用波动理论解释偏振的线索，说[②]：“用这个理论也可以解释沿半径方向以相等速度传播的横向振动，其粒子的运动是在相对于半径的某个恒定的方向。这就是偏振。”1818 年 4 月 29 日，托马斯·杨再次写信给阿拉果，又提到偏振问题，他把光比之于绳索的振动。阿拉果把这封信给菲涅耳看，菲涅耳立即看出这一比喻为互相垂直的两束偏振光之所以不能相干提供了真正的解释，而这一不相干性正可作为杨氏假说的极好佐证。

阿拉果和菲涅耳合作研究光学多年，互相垂直的两束偏振光的相干性是他们共同研究的课题，就这个课题已进行了多次实验，得到了重要成果。1819 年，他们联名发表了《关于偏振光线的相互作用》[①]。但是当菲涅耳指出，只有横向振动才有可能把这个事实纳入波动理论时，阿拉

[②] 梅森著，周煦良等译，自然科学史，上海译文出版社，1980 年，p.441.

[①] F．Cajori, A History of Physics, MacMillan,1933,p.154.

[②] 同上。

[①] 转引自：W. F. Magie,Source Book in Physics, McGraw-Hill,1935, p.325.

果表示自己没有勇气发表这类观点，于是论文的第二部分乃以菲涅耳一人的名义发表。阿拉果在光学方面作出了许多贡献，但在关键问题上却令人遗憾地采取了暧昧态度。

菲涅耳的光学研究和法国科学院 1818 年的悬奖征文活动有一些联系。这次竞赛的题目是[②]：

“①……利用精密的实验确定光线的衍射效应。

②根据实验用数学归纳法推导出光线通过物体附近时的运动情况。”

竞赛的评奖委员会的本意是希望通过这次征文，鼓励用微粒理论解释衍射现象，以期取得微粒理论的决定性胜利。主持这项活动的著名科学家，例如：比奥（J.B.Biot）、拉普拉斯和泊松（S.D.Poission）都是微粒说的积极拥护者。

然而，出乎意料地是，不知名的学者菲涅耳（当时只有 30 岁）以严密的数学推理，从横波观点出发，圆满地解释了光的偏振，并用半波带法定量地计算了圆孔、圆板等形状的障碍物所产生的衍射花纹，推出的结果与实验符合得很好，使评奖委员会大为惊讶。比奥叹服菲涅耳的才能，写道：[③]“菲涅耳从这个观点出发，严格地把所有衍射现象归于统一的观点，并用公式予以概括，从而永恒地确定了它们之间的相互关系。”评奖委员泊松在审查菲涅耳的理论时，运用菲涅耳的方程推导圆盘衍射，得到了一个令人稀奇的结果：在盘后方一定距离的屏幕上影子的中心应出现亮点，如图 4–16。泊松认为这是荒谬的，在影子的中心怎么可能出现亮点呢？于是就声称这个理论已被驳倒。在这个关键时刻，阿拉果向菲涅耳伸出了友谊之手，他用实验对泊松提出的问题进行了检验。实验非常精彩地证实了菲涅耳理论的结论，影子中心果然出现了一个亮点。这一事实轰动了巴黎的法国科学院。

■图 4–16 泊松亮点

菲涅耳于是就荣获了这一届的科学奖，而后人却戏剧性地称这个亮点为泊松亮点。

菲涅耳开创了光学研究的新阶段。他发展了惠更斯和托马斯·杨的波动理论，成为“物理光学的缔造者”。

§4.5　光谱的研究

4.5.1　历史的回顾

在 4.3 节我们介绍过牛顿的色散实验。可以说，光谱学的历史就是

[②] Б.И.斯杰潘诺夫著，尚惠春译，光学三百年，科学普及出版社，1981 年，p.21.

[③] 同上，p.22.

从这里开始的。不过牛顿并没有观察到光谱谱线，因为他当时不是用狭缝，而是用圆孔作光阑。据说当时他也曾想到用狭缝，但他委托助手来做这部分实验，而助手不了解他的意图，因而失去了发现的机会。

以后一百多年这方面并没有重大进展。在文献上记载的只有英国的梅耳维尔（Thomas Melvill，1726—1753）。1748—49 年间，他用棱镜观察了多种材料的火焰光谱，包括钠的黄线[①]。直到 1800 年，赫谢尔（William Herschel，1738—1822）测量太阳光谱中各部分的热效应，发现红端辐射温度较高，他注意到红端以外的区域，也具有热效应，从而发现了红外线。1801 年，里特（Johann WilhelmRitter，1776—1810）发现了紫外线，他从氯化银变黑肯定在紫端之外存在看不见的光辐射。他还根据这一化学作用判断紫外线比可见光具有更高的能量。

1802 年，沃拉斯顿（William Hyde Wollaston，1766—1828）观察到太阳光谱的不连续性，发现中间有多条黑线，但他误认为是颜色的分界线。

1803 年，托马斯·杨进行光的干涉实验，第一次提供了测定波长的方法。

德国物理学家夫琅和费（Joseph von Fraunhofer，1787—1826）在光谱学上作过重大贡献。他对太阳光谱进行过细心的检验，1814—1815 年，他向慕尼黑科学院展示了自己编绘的太阳光谱图，内有多条黑线，并对其中八根显要的黑线标以 A 至 H 等字母（人称夫琅和费线），这些黑线后来就成为比较不同琉璃材料色散率的标准，并为光谱精确测量提供了基础。是他发明了衍射光栅。开始他用银丝缠在两根螺杆上，做成光栅，后来建造了刻纹机，用金钢石在玻璃上刻痕，做成透射光栅。他用自制的光栅获得 D 线的波长为 0.00058877 毫米。

其后，光谱的性质逐渐被人们认识，并受到了重视。许多人进行过光谱方面的实验，认识到发射光谱与光源的化学成分以及光源的激发方式有密切关系。1848 年，傅科（Jean Leon Foucault,1819—1868）注意到钠焰既发射 D 线，同时也会从更强的弧光吸收 D 线。

1859 年，基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff，1824—1887）对光的吸收和发射之间的关系作了深入研究。他和本生（RobertWilhelm Bunsen，1811—1899）研究了各种火焰光谱和火花光谱，并且在研究碱金属的光谱时发现了铯（1860 年）和铷（1861 年）。接着，克鲁克斯发现了铊，里奇发现了铟（1863 年），波依斯邦德朗发现了镓（1875 年），用的都是光谱方法。

光谱分析对鉴定化学成分的巨大意义，导致了光谱研究工作的急骤发展。然而，由于当时缺乏足够精度的波长标准，观测结果很是混乱。

[①] 见 F.Cajori, A History of Physics, MacMillan, MacMillan, 1933, p.161.

例如，基尔霍夫在论文中表述光谱用的是他自己从光谱仪测微计上得到的读数。显然，这样的数据别人是无法利用的。1868 年，埃格斯特朗（Anders JonasÅngström，1814—1874）发表“标准太阳光谱”图表，记有上千条夫琅和费线的波长，以 10^{-8} 厘米为单位，精确到六位数字，为光谱工作者提供了极其有用的资料。埃格斯特朗是瑞典阿普沙拉大学物理教授，作过天文观测站工作，多年从事光谱学的工作，对光谱的性质、合金光谱、太阳光谱以及吸收光谱和发射光谱间的关系作过一系列研究，特别是对光谱波长的精确测量进行过大量的艰苦工作。为了纪念他的功绩，10^{-8} 厘米后来就命名为埃格斯特朗单位（简写作Å）。埃格斯特朗的光谱数据用作国际标准达十几年，后来发现阿普沙拉市的标准米尺与巴黎的米原器相比，不是 999.81 毫米，而是 999.94 毫米，致使埃格斯特朗的光谱数据有系统误差，1887—1893 年后，被罗兰的数据所代替。

罗兰（Henry Augustus Rowland，1848—1901）是美国约翰·霍普金斯大学教授。他以周密的设计、精巧的工艺制成了高分辨率的平面光栅和凹面光栅，获得的太阳光谱极为精细，拍摄的光谱底片展开可达 50 英尺，波长从 2152.91Å 到 7714.68Å，用符合法求波长，精确度小于 0.01Å。

氢光谱的获得也要归功于埃格斯特朗，是他首先从气体放电的光谱中找到了氢的红线，即 H_α 线，并证明它就是夫琅和费从太阳光谱发现的 C 线。后来，又发现另外几根可见光区域内的氢谱，并精确地测量了它们的波长。1880 年胡金斯（William Huggins，1824—1910）和沃格尔（Hermann Carl Vogel，1841—1907）成功地拍摄了恒星的光谱，发现这几根氢光谱线还可扩展到紫外区，组成一光谱系。这个光谱系具有鲜明的阶梯形，一根接着一根，非常有规律。可是，即使这样明显的排列，人们也无法解释。

19 世纪 80 年代初，光谱学已经取得很大发展，积累了大量的数据资料。摆在物理学家面前的任务，是整理这些浩繁杂乱的资料，找出其中的规律，并对光谱的成因，即光谱与物质的关系作出理论解释。

4.5.2 巴耳末发现氢光谱规律

正是在这一形势面前，许多物理学家都在试图寻求光谱的规律。法国的 M．马斯卡特，波依斯邦德朗都曾发表过这方面的文章。他们将光谱线类比于声学谐音，用力学振动系统说明光的发射，企图从中找到光谱线之间的关系。英国的斯坦尼（G. John－stone Stoney，1826—1911）根据基音和谐音的关系，竟从三条可见光区域的氢谱线波长为 20：27：32 之比，猜测基音波长应为 131277.14Å，这种说法当然过于牵强，于是有人，例如 1882 年舒斯特（A. Schuster），甚至悲观地指出：“在目前的精度内，要找到谱线的数量关系是没有意义的。”

当时的物理学家往往习惯于用力学系统来处理问题，摆脱不了传统观念的束缚，也许正是由于这个原因，在光谱规律的研究上首先打开突破口的不是物理学家，而是瑞士的一位中学数学教师巴耳末（Johann Jakob Balmer，1825—1898）。他受到巴塞尔大学一位对光谱很有研究的物理教授哈根拜希（E. Hagenbach）的鼓励，试图寻找氢光谱的规律。（巴耳末在巴塞尔大学兼课）。巴耳末擅长投影几何，写过这方面的教科书，对建筑结构、透视图形、几何素描有浓厚兴趣。他在这方面的特长使他有可能取得物理学家没有想到的结果。

1884 年 6 月 25 日巴耳末在瑞士的巴塞尔市向全国科学协会报告了自己的发现：

氢光谱公式：$\lambda = b\frac{m^2}{m^2 - n^2}$，

次年发表了论文。在论文中是这样叙述的[①]：

“在 H.W.沃格尔和胡金斯对氢光谱紫外线测量的基础上，我曾试图建立一公式，以满意地代表各谱线的波长。这件工作得到了哈根拜希教授的鼓励。

“埃格斯特朗对氢谱线的精确测量使我有可能为这些谱线的波长确定一共同因子，以最简便的方法表示这些波长的数量关系。于是，我逐渐达到了一个公式，至少可以对这四根谱线以惊人的精度得到它们的波长，这一公式是光谱定律的生动表示式。“从埃格斯特朗的测定，推出这个公式的共同因子是 b= 3645.6×10^{-7} 毫米……”

“氢的前四根谱线的波长可以从这一基数相继乘以系数 9/5、4/3、25/21 与 9/8。初看起来这四个系数没有构成规则数列，但如果第二项与第四项分子分母分别乘 4，则分子为 3^2、4^2、5^2、6^2，而分母相应地差 4。

“由于几种原因，使我相信，这四个系数属于两个数列，第二数列包含有第一数列。最后，我终于提出一个更普遍的形式：$m^2/(m^2-n^2)$，其中 m、n 均为整数。……”

“如果用这些系数和基数 3645.6 计算波长，以 10^{-7} 毫米作单位，得下列数：

[①] 转引自 W.F.Magie, A Source Book in Physics McGraw-Hill,1935, p.360.

依据公式	埃格斯特朗给出	差值
H_{α}（C线） $=\frac{9}{5}b=6562.08$	6562.10	+0.02
H_{β}（F线） $=\frac{4}{3}b=4860.8$	4860.74	-0.06
H_{γ}（邻近G） $=\frac{25}{21}b=4340$	4340.1	+0.1
H_{ς}（B线） $=\frac{9}{8}b=4101.3$	4101.2	-0.1

“公式与埃格斯特朗观测值的偏差最大不超过波长的 1/40000,这个偏差很可能就在观测的可能误差范围之内。这真是一个极好的证据，说明埃格斯特朗该是以何等高超的科学技巧和细心从事这项工作的。”

巴耳末在论文中没有具体介绍是怎样找到这个基本因子的。有人查考了他当年的手稿并根据旁人的回忆，判断他有这样的一段经历[①]：

(1)开始，巴耳末也是采用在谱线间找谐和关系的办法，后来感到这个不符合谱线的实际情况，终于摒弃了这一方案。

(2)他借助几何图形领悟到谱线波长趋近于某一极值，又从几何图形推测出平方关系，经过反复校核，确定埃格斯特朗的数据最为精确，并找到了这个共同因子。

(3)后来，他得到哈根拜希教授之助，将建立的公式与紫外区的五根氢谱线核对，证明也是正确的，这才有把握公之于众。

这就是巴耳末公式的发现经过。这个公式打开了光谱奥秘的大门，找到了译解原子“密码”的依据，此后光谱规律陆续总结出来，原子光谱逐渐形成了一门系统的学科。

4.5.3 里德伯的普遍公式

瑞典物理学家里德伯（Johannes Robert Rydberg，1854—1919）则是沿另外一条途径找到光谱规律的。1890 年他发表了元素光谱的普遍公式。为了研究元素的周期性，他收集和整理了大量的光谱资料，其中锂、钠、钾和镁、锌、镉、汞、铝等元素的谱线波长数据，对他总结光谱公式提供了重要依据，然而关键的启示是已有一些物理学家在他之前用波长的倒数代替波长来表示谱线。

1871 年，G. J. 斯坦尼第一次尝试用波长的倒数表示光谱线，并建议取名为波数。1871 年《英国学会报告》中有过这样的报道[①]：

[①] L.Banet,Am.J.Phys.34（1966）p.496

[①] K.T.Conn,H.D.Turner,TheEvolutionoftheNuclearAtom,London,1965,p.74.

“用这个尺度（指波数）对研究有很大方便，（因为谐和关系的）光谱线系可表示成等距的。这种方法还有更为方便之处，即这样描绘光谱，比埃格斯特朗的经典光谱图中用波长尺度描绘更接近于从光谱仪直接看到的情景。”

1883 年，哈特莱（W.N.Hartrey）用波数表示法取得重大成功，他发现所有三重线的谱线系，例如锌光谱，如果用波数表示，同一谱系中各组三重线的间距总是相等的。利夫因（G.D.Liveing）和杜瓦（J.Dewar）同时也得到类似结果。1885 年，考尔纽（A.Cor–nu）观察到铊和铝的紫外光谱的双线中也有类似的情况。

1890 年，里德伯在《哲学杂志》上发表论文，题为《论化学元素线光谱的结构》，论文列举了大量光谱数据，对光谱规律作出总结，他写道：

“谱系的各项是相继整数的函数，各谱系可近似用下式表示：

$$n = n_0 - \frac{n_0}{(m+\mu)^2}$$

内 n 是波数，m 是正整数，N_0=109721.6，对所有谱系均为一共同常数，n_0与μ是某一谱系特有的常数。将可见到，n_0表示当 m 变为无穷大时波数 n 趋向的极值。”

“同一族（漫族或锐族）的谱系μ值相同，不同族中同一级的谱线n_0相同……”

里德伯的工作在巴耳末之后，但他并不知道巴耳末公式。直到 1890 年，当他获知巴耳末公式并且将巴耳末公式用波数表示，发现这正是自己所得公式的一个特例，这才对自己的工作有了更充分的把握。

后来，凯塞（H.Kayser）、龙格（G.Runge）、舒斯特、里兹（Walther Ritz，1878—1909）等人继续进行了谱系的整理研究，续有进展。

里德伯和舒斯特独立地发现里德伯–舒斯特定律，即主系的极值与锐系、漫系的共同极值之差等于主系的初项。

1908 年，里兹提出组合原理，把谱线表为二项之差：

$$v = T_1 - T_2$$

光谱项$T = \frac{N_0}{(m+\mu+\beta/m^2)^2}$，内μ与β都是某一谱系专有的常数；里兹还发现，任何二条谱线之和与差往往可以找到另一谱线，他预言氢谱H_α与H_β之差可得一新谱线，果然帕邢（FriedrichPaschen，1865—1947）在 1908 年从红外区找到了，从而发现了氢的帕邢谱系。

里兹的组合原理使光谱研究由光谱线转向光谱项，比以前深入了一步。然而，所有这些光谱规律仍然是经验性的。究竟光谱的成因是什么？为什么会有这些规律？它和物质构造有什么本质上的联系？这些问题摆在物理学家面前亟待解决。我们在第八章将会再涉及这些问题。

第五章　19—20 世纪之交物理学的新发现和物理学革命

§5.1　历史概述

19 世纪末，物理学已经有了相当的发展，几个主要部门——力学、热力学和分子运动论、电磁学以及光学，都已经建立了完整的理论体系，在应用上也取得了巨大成果。这时物理学家普遍认为，物理学已经发展到顶，伟大的发现不会再有了，以后的任务无非是在细节上作些补充和修正，使常数测得更精确而已。

然而，正在这个时候，从实验上陆续出现了一系列重大发现，打破了沉闷的空气，把人们的注意力引向更深入、更广阔的天地，从而揭开了现代物理学革命的序幕。从伦琴发现 X 射线的 1895 年开始，到 1905 年爱因斯坦发表三篇著名论文为止，在这 10 年左右世纪之交的年代里，具有重大意义的实验发现如下页表。

这一系列的发现集中在世纪之交的年代里不是偶然的，是生产和技术发展的必然产物。特别是电力工业的发展，电气照明开始广泛应用，促使科学家研究气体放电和真空技术，才有可能发现阴极射线，从而导致了 X 射线和电子的发现，而 X 射线一旦发现，立即取得了广泛应用，又掀起了人们研究物理学的热潮。所以，随着 X 射线的发现而迅速展开的这一场物理学革命，有其深刻的社会背景和历史渊源。本章将分三个方面介绍与物理学革命关系最密切的一些实验发现。

年代	人物	贡献
1895	伦琴	发现 X 射线
1896	贝克勒尔	发现放射性
1896	塞曼	发现磁场使光谱线分裂
1897	J．J．汤姆生	发现电子
1898	卢瑟福	发现α、β射线
1898	居里夫妇	发现放射性元素钋和镭
1899—1900	卢梅尔和鲁本斯等人	发现热辐射能量分布曲线偏离维恩分布律
1900	维拉德	发现γ射线
1901	考夫曼	发现电子的质量随速度增加
1902	勒纳德	发现光电效应基本规律
1902	里查森	发现热电子发射规律
1903	卢瑟福和索迪	发现放射性元素的蜕变规律

§5.2　X 射线和电子的发现

X 射线、放射性和电子是世纪之交的三大发现。由于电子的发现直接与阴极射线的研究有关，我们先讲这件事。放射性的发现打开了核物理学的大门，因此留到第十一章再讲。

5.2.1　电子的发现

阴极射线是低压气体放电过程出现的一种奇特现象。早在 1858 年就由德国物理学家普吕克尔（JuliusPlücker，1801—1868）在观察放电管中的放电现象时发现。当时他看到正对阴极的管壁发出绿色的荧光。1876 年，另一位德国物理学家哥尔茨坦（Eügen Goldstein， 1850—1930）认为这是从阴极发出的某种射线，并命名为阴极射线。他根据这一射线会引起化学作用的性质，判断它是类似于紫外线的以太波。这一观点后来得到了赫兹等人的支持。赫兹在 1887 年曾发现电磁波，就把阴极射线看成是电磁辐射，实际上和哥尔茨坦的主张是一样的。这样就形成了以太说。赞成以太说的大多是德国人。

1871 年，英国物理学家瓦尔利（C.F.Varley，1828—1883）从阴极射线在磁场中受到偏转的事实，提出这一射线是由带负电的物质微粒组成的设想。他的主张得到本国人克鲁克斯（WilliamCrookes，1832—1919）和舒斯特的赞同。于是在 19 世纪的后 30 年，形成了两种对立的观点：德国学派主张以太说，英国学派主张带电微粒说。双方争持不下，谁也说服不了谁。为了找到有利于自己观点的证据，双方都做了许多实验。克鲁克斯证实阴极射线不但能传递能量，还能传递动量。他认为阴极射线是由于残余气体分子撞到阴极，因而带上了负电，又在电场中运动形成“分子流”。以太论者不同意这一说法，用实验加以驳斥。哥尔茨坦做了一个很精确的光谱实验。他用一根特制的 L 形放电管，电极 A、B 可以互换，轮流充当阴极，用光谱仪观测谱线，如图 5–1。如果阴极射线是分子流，它发出的光应产生多普勒效应，即光的频率应与分子流速度方向有关。可是，不管是那一端发出阴极射线，谱线的波长都没有改变。这就证明了分子流之说站不住脚。以太论者认为这是对以太说的一个支持。

■图 5–1 哥尔茨坦的光谱实验

舒斯特则将带电微粒解释成气体分子自然分解出来的碎片，带正电的部分被阴极俘获，电极间只留下带负电的部分，因而形成阴极射线。1890 年，他根据磁偏转的半径和电极间的电位差估算带电微粒的荷质比，得到的结果在 5×10^{6} 库仑/千克至 1×10^{10} 库仑/千克之间，与电解所得的氢离子的荷质比 10^{8} 库仑/千克相比，数量级相近。

赫兹和他的学生勒纳德（Philipp Lenard， 1862—1947）也做了许多实验来证明自己的以太理论。赫兹做的真空管中电流分布的实验，“证

明”阴极射线的走向与真空管中电流的分布无关。他还在阴极射线管中加垂直于阴极射线的电场，却没有看到阴极射线受到任何偏转。这两个实验不成功的原因是因为当时不了解低压状态下气体导电机制的复杂性。遗憾的是，赫兹以此作为阴极射线不带电的证据，更加坚持以太说。赫兹做的另一实验则是成功的。1891 年，他注意到阴极射线可以象光透过透明物质那样地透过某些金属薄片。1894 年，勒纳德发表了更精细的结果。他在阴极射线管的末端嵌上厚仅 0.000265 厘米的薄铝箔作为窗口，如图 5–2，发现从铝窗口会逸出射线。在空气中穿越约 1 厘米的行程。他们认为这又是以太说的有力证据，因为只有波才能穿越实物。

■图 5–2 勒纳德的铝窗实验

微粒说者也在积极寻找证据。1895 年法国物理学家佩兰（Jean Baptiste Perrin，1870—1942）将圆桶电极安装在阴极射线管中，用静电计测圆桶接收到的电荷。结果确是负电。他支持带电微粒说，发表论文表示了自己的观点。但是他的实验无法作出判决性的结论。因为反对者会反驳说：佩兰测到的不一定就是阴极射线所带的电荷。

■图 5–3 佩兰测阴极射线的电荷（其中 B 是阳极，C 是阴极，F 是法拉第圆桶）

对阴极射线的本性作出正确答案的是英国剑桥大学卡文迪什实验室教授 J.J.汤姆生（JosephJohnThomson，1856—1940）。他从 1890 年起，就带领自己的学生研究阴极射线。克鲁克斯和舒斯特的思想对他很有影响。他认为带电微粒说更符合实际，决心用实验进行周密考察，找出确凿证据。为此，他进行了以下几方面的实验：

1．直接测阴极射线携带的电荷。J.J.汤姆生将佩兰实验作了一些改进。他把联到静电计的电荷接受器（法拉第圆桶）安装在真空管的一侧，如图 5–4。平时没有电荷进入接收器。用磁场使射线偏折，当磁场达到某一值时，接收器接收到的电荷猛增，说明电荷确是来自阴极射线。

■图 5–4J.J.汤姆生测阴极射线所带电荷的实验装置

2．使阴极射线受静电偏转。J.J.汤姆生重复了赫兹的静电场偏转实验，起初也得不到任何偏转。后来经仔细观察，注意到在刚加上电压的瞬间，射束轻微地摆动了一下。他马上领悟到，这是由于残余气体分子在电场的作用下发生了电离，正负离子把电极上射线所带电荷的实验装置的电压抵消掉了。显然这是由于真空度不够高的原因。于是，他在实验室技师的协助下努力改善真空条件，并且减小极间电压，终于获得了稳定的静电偏转。这样，J.J.汤姆生就获得了驳斥以太说的重要证据。

3．用不同方法测阴极射线的荷质比。一种方法是在图 5–5 的管子两侧各加一通电线圈，以产生垂直于电场方向的磁场。然后根据电场和磁场分别造成的偏转，计算出阴极射线的荷质比 e/m 与微粒运动的速度。

■图 5–5J.J.汤姆生静电偏转管

另一种方法是测量阳极的温升，因为阴极射线撞击到阳极，会引起阳极的温度升高。J.J.汤姆生把热电偶接到阳极，测量它的温度变化。根据温升和阳极的热容量可以计算粒子的动能，再从阴极射线在磁场中偏转的曲率半径，推算出阴极射线的荷质比与速度。

两种不同的方法得到的结果相近，荷质比都是 $e/m \approx 10^{11}$ 库仑/千克。

4．证明电子存在的普遍性。J.J.汤姆生还用不同的阴极和不同的气体做实验，结果荷质比也都是同一数量级，证明各种条件下得到的都是同样的带电粒子流，与电极材料无关，与气体成分也无关。

1897 年 4 月 30 日，J.J.汤姆生向英国皇家研究所报告了自己的工作，随即又以《论阴极射线》为题发表论文，其中写道①：

“阴极射线的载荷子比起电解的氢离子，m/e 值小得多。m/e 小的原因可能是 m 小，也可能是 e 大，或两者兼而有之。我想，阴极射线的载荷子要比普通分子小。这可从勒纳德的结果看出。”

这里指的就是勒纳德的薄窗实验，只有把阴极射线的载荷子看成比普通分子小得多，才能解释阴极射线透过薄铝片的事实。

接着，J.J.汤姆生和他的学生们用几种方法直接测到了阴极射线载荷子所带的电量，证明的确跟氢离子的带电量相同。1899 年，J.J.汤姆生采用斯坦尼（G.T.Stoney，1826—1911）的“电子”一词来表示他的“载荷子”。“电子”原是斯坦尼在 1891 年用于表示电的自然单位的。

就这样电子被发现了。但是 J.J.汤姆生并不到此止步，他进一步又研究了许多新发现的现象，以证明电子存在的普遍性。

光电效应是 1887 年赫兹发现的，但时隔十几年，光电流的本质仍未搞清。1899 年，J.J.汤姆生用磁场偏转法测光电流的荷质比。得到的结果与阴极射线相近，证明光电流也是由电子组成的，详见§7.3。

热电发射效应是 1884 年爱迪生（ThomasEdison，1847—1931）发现的，所以也称爱迪生效应。爱迪生当时正在研究白炽灯泡，发现灯泡里的白炽碳丝加热后有负电逸出（如图 5-6）。1899 年，J.J.汤姆生同样用磁场截止法测其荷质比，证明这一负电荷也是电子。

■图 5-6 热电发射效应（金属板上接收到负电荷）

β射线是卢瑟福（Ernest Rutherford，1871—1937）在 1898 年发现的（详见第十一章），不久，贝克勒尔（HenriBecquer-el，1852—1908）用磁场和电场偏转法测得β射线的荷质比和速度，证明β射线是高速电子流。

J.J.汤姆生掌握了大量的实验事实，果断地作出判断：不论是阴极射线、β射线还是光电流，都是电子组成的；不论是由于强电场的电离、

① J.J.Thomson,Phil.Mag.(5)44,1897,p.293.

正离子的轰击、紫外光的照射、金属受灼热还是放射性物质的自发辐射，都发射出同样的带电粒子——电子。这种带电粒子比原子小千倍，可见，电子是原子的组成部分，是物质的更基本的单元。这是一个非常重要的结论。原子不可分的传统观念彻底破灭了。

5.2.2 X 射线的发现

十九世纪末，阴极射线研究是物理学的热门课题。许多物理实验室都致力于这个方面。在德国的维尔茨堡大学，伦琴（WilhelmKonradRóntgen，1845—1923）教授也对这个问题感兴趣。他是一位治学严谨、造诣很深的实验物理学家。1895 年 11 月 8 日，他又到实验室工作，一个偶然事件吸引了他的注意。当时，房间一片漆黑，放电管用黑纸包严。他突然发现在不超过一米远的小桌上有一块亚铂氰化钡做成的荧光屏发出闪光。他很奇怪，就移远荧光屏继续试验。只见荧光屏的闪光，仍随放电过程的节拍断续出现。他取来各种不同的物品，包括书本、木板、铝片等等，放在放电管和荧光屏之间，发现不同的物品效果很不一样。有的挡不住，有的起阻档作用。显然从放电管发出了一种穿透力很强的射线。为了确证这一新射线的存在，并且尽可能了解它的特性，伦琴用了 6 个星期深入地研究这一现象。1895 年底，他以通信方式将这一发现公之于众。由于这一射线有强大的穿透力，能够透过人体显示骨骼和薄金属中的缺陷，在医疗上和金属检测上有重大的应用价值，因此引起了人们的极大兴趣。一个月内许多国家都竞相开展类似的试验并广泛用之于医疗诊断。一股热潮席卷欧美，盛况空前。

伦琴在他的论文中把这一新射线称为 X 射线，因为他当时确实无法确定这一新射线的本质。直到 1912 年，他的同胞劳厄（Maxvon Laue，1879—1960）才从晶体衍射的新发现判定 X 射线是频率极高的电磁波。随后，莫塞莱（H.G.J.Moseley）证实它是由于原子中内层电子跃迁所发出的辐射。

X 射线在人们研究阴极射线的过程中被发现是有其必然性的。因为正是高速电子打到靶子上，才有可能激发出这种高频辐射。所以，即使不是伦琴，也一定还会有别人可能作出这一发现。然而，伦琴之所以能抓住这一机遇，又是和他一贯的严谨作风、客观的科学态度分不开的。所以，他作出这一发现也有其必然性。我们来介绍几则事例，可由此看出伦琴比他人高明的地方。

1880 年，那位主张以太说的哥尔茨坦在研究阴极射线时就注意到阴极射线管壁上会发出一种特殊的辐射，使管内的荧光屏发光。当时他正在为阴极射线是以太的波动这个错误论点辩护。他认为这个现象正好说明了他的观点，没有想到要进一步追查根源，于是就错过了发现 X 射线的机会。

1895 年以前许多人都知道照相底片不要存放在阴极射线装置旁边，

否则有可能变黑。例如，英国牛津有一位物理学家叫斯密士（F. Smith），他发现保存在盒中的底片变黑了，这个盒子就搁在克鲁克斯型放电管附近，他只叫助手以后把底片放到别处保存，没有认真追究原因。

1887 年，早于伦琴发现 X 射线 8 年，克鲁克斯也曾发现过类似现象。他把变黑的底片退还厂家，认为是底片质量有问题。

1890 年 2 月 22 日，美国宾夕法尼亚大学的古茨彼德（A.W.Goodspeed）也有过同样的遭遇，甚至还拍摄到了物体的 X 光照片，但他没有介意，随手把底片扔到废片堆里，被他遗忘了。6 年后，得知伦琴宣布发现 X 射线，古茨彼德才想起这件事，重新加以研究。

1894 年，J.J.汤姆生在测阴极射线的速度时，也作了观察到 X 射线的记录。他当时没有功夫专门研究这一现象，只在论文中提了一笔，说看到了放电管几英尺远处的玻璃管上也发出荧光。

勒纳德是研究阴极射线的权威学者之一。他在研究不同物质对阴极射线的吸收时，肯定也遇到了 X 射线。他后来在 1906 年获诺贝尔物理奖的演说词中说[①]："我曾做过好几次观测。当时解释不了，准备留待以后研究。不幸没有及时开始。"不过，即使勒纳德及时研究，也难于作出正确结论，因为直到伦琴宣布 X 射线的发现以后，他还坚持认为 X 射线不过是速度无限大的一种阴极射线，把两者混淆在一起。而伦琴则明确加以区分，认为 X 射线是本质上与阴极射线不同的一种新射线。把发现 X 射线的荣誉归于伦琴，并授予诺贝尔首届物理奖，伦琴是当之无愧的。

5.2.3 "电磁质量"的发现

在研究阴极射线并测量其荷质比时，人们遇到了一个奇特现象，电子的质量会随速度的增加而增加，这一事实为爱因斯坦狭义相对论提供了重要依据。不过，中间也有不少曲折。

1878 年罗兰用实验演示了运动电荷产生磁场的事实，促使人们开始研究运动带电体的问题。1881 年，J.J.汤姆生首先提出，既然带电体运动要比不带电体需要外界作更多的功，带电体的动能就要比不带电体大，换言之，带电体应具有更大的质量。后来，人们用"电磁质量"来代表这一部分增加的质量。J.J.汤姆生用麦克斯韦电磁理论计算半径为 a 的导体球，设其所带电荷为 e，运动速度为 v，则电磁质量为：

$$m_e = \frac{4\mu e^2}{15\alpha}$$

其中 μ 为磁导率。

1889 年，亥维赛（Oliver Heaviside）改进了汤姆生的计算，并推导出当运动带电体的速度接近光速 c 时，物体能量可达无穷大，条件是电荷集中在带电球体的赤道线上。

[①] 转引自 O.Glasser,Wilhelm Conrad R(ntgen and the Early History of the R(nt-gen Rays, Bale, 1933, p. 224.

1897 年，舍耳（Searle）假设电子相当于一无限薄的带电球壳，计算其电磁质量为：

$$m_e = \frac{e}{2\alpha v^2}\left[\frac{2}{1-\beta^2} - \frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)\right]$$

其中β≡v/c

这时，电子已经发现，电子已被认为是物质的最小组成部分。人们开始注意在实验中研究电磁质量问题。

1901 年考夫曼（WaltherKaufmann，1871—1947）用β射线做实验，证实电子的质荷比确随速度的增大而增大。第一次观测到了电磁质量。

1903 年，阿伯拉罕（M.Abraham）用经典电磁理论系统地研究了电磁质量问题，导出了电磁质量随速度变化的关系：

$$m = \frac{3}{4}\frac{m_0}{\beta^2}\left[\frac{1+\beta^2}{2\beta} \cdot \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right) - 1\right]$$

式中 m_0 为电子的静止质量。

1904 年，洛仑兹把收缩假设（见下节）用于电子，推出如下关系：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

这个关系也可以从爱因斯坦的狭义相对论推导出来，所以叫洛仑兹–爱因斯坦公式。

然而，考夫曼的进一步实验却倾向于经典理论，他宣称：“量度结果与洛仑兹–爱因斯坦的基本假设不相容。”

对此，爱因斯坦在 1907 年写道[①]：“阿伯拉罕……的电子运动理论所给出的曲线显然比相对论得出的曲线更符合于观测结果。但是，在我看来，那些理论在颇大程度上是由于偶然碰巧与实验结果相符。因为它们关于运动电子质量的基本假设不是从总结了大量现象的理论体系得出来的。”

果然，不久后，好几个地方做了新的实验，证明爱因斯坦的结果符合实际。就这样，从经典物理学提出的电磁质量问题，反而成了相对论的重要证据。

§5.3 “以太漂移”的探索

如果说，电子和“电磁质量”的发现，从电的方面为现代物理学开辟了道路，那么，“以太漂移”的探索则从光的方面打开了另一个缺口，促使物理学革命的爆发。

5.3.1 光行差的观测

[①] 范岱年等编译，爱因斯坦文集，第二卷，商务印书馆，1979 年，第 181 页

“以太漂移”问题是从光行差的观测开始提出的。1725—1728年，英国天文学家布拉德雷（James Bradley，1693—1762）对恒星的方位作了一系列的精确测量，把恒星一年四季的位置折算到天顶，发现都呈圆形轨迹。他百思不得其解。据说，由于有一次偶然他注意到所乘的船改变航向时，船上的旗帜飘向不同的方向，才领悟到这一现象是因为地球围绕太阳旋转所致。他写道[①]：

“假想CA（图5–7）是一条光线，垂直地落到直线BD上，如果眼睛（指观察者）静止于A点，那么不管光的传播需要时间还是只需瞬间，物体必然出现在AC方向上。但是，如果眼睛（观察者）从B向A运动，而光的传播又需要时间，光的速度与眼睛（观察者）的速度比等于CA与BA之比，则当眼睛（观察者）从B运动到A时，光从C传播到了A……”

■图5–7 布拉德雷解释光行差用图

若用α表示∠ACB，v表示观察者的速度，则 tgα=v/c这一关系完全适用于天体的光行差现象，布拉德雷测到的α角为（40.5/2）"≈20"，代入上式，得：

$c=v/\alpha=3.1\times10^{10}$ 厘米/秒 $=3.1\times10^{5}$ 千米/秒，其中v=30千米/秒。

这是光速的最早的数值。

5.3.2 阿拉果的望远镜实验

阿拉果（D．F．J．Arago，1786—1853）是法国著名物理学家。由于他曾从事过大气折射的光学研究，引起了对光速的兴趣。他从牛顿力学速度叠加原理出发，认为如果发光体和观测者的运动速度不同，光速应有差别，布拉德雷的观测精度有限，没有显出有这种差别。于是他亲自做了一个实验：在望远镜外用消色差棱镜加于望远镜视场的半边，然后用望远镜观测光行差。但是实际观测结果却是经过棱镜和不经过棱镜的两边，光行差完全相同。其实这正说明经典的速度叠加原理不适用于光的传播。但是阿拉果却和布拉德雷一样，都是光微粒说的信仰者，只能在微波说的前提下作一个很勉强的假设。他假设星体以无数种速度发射光的微粒，只是因为人眼对光有选择性，只能接收某一特定速度的光微粒，所以看不出差别。

不久，托马斯·杨和菲涅耳倡导光的波动说获得进展，阿拉果转向波动说，1815年曾写信给菲涅耳，告诉他几年前自己做的望远镜实验，征询菲涅耳能否用波动理论予以说明。说到这里，应补充一点有关以太观念的介绍。

5.3.3 以太观念的兴起

以太观念的提出可以追溯到古希腊时代。亚里士多德认为天体间一定充满有某种媒质。笛卡儿1644年发表的《哲学原理》中就引用了以太

[①] W．F．Magie，ASourceBookinPhysics，McGraw-Hill，1935p．337．

的观念。他认为“虚空”是不可能存在的，整个宇宙充满着一种特殊的易动物体——以太。由于太阳周围以太出现旋涡，才造成行星围绕太阳的运动。1678 年惠更斯把光振动类比于声振动，看成是以太中的弹性脉冲。但是后来由于光的微粒说占了上风，以太理论受到压抑。牛顿就认为不需要以太。他主张超距作用，倾向于微粒说。1800 年以后，由于波动说成功地解释了干涉、衍射和偏振等现象，以太学说重新抬头。在波动说的支持者看来，光既然是一种波，就一定要有一种载体。光能通过万籁俱寂的虚空，证明在虚空中充满这种载体，这就是以太。他们把以太看成是无所不在、绝对静止、极其稀薄的刚性“物质”。例如：1804 年托马斯·杨写道：“光以太充满所有物质之中，很少受到或不受阻力，就像风从一小丛林中穿过一样”。

但是，直到 19 世纪还没有一个实验能直接证明以太的实际存在。布拉德雷的观测和阿拉果实验之间的不协调开始揭示了以太理论的隐患。

5.3.4　菲涅耳提出部分曳引假说

对于阿拉果的人眼选择光速的假设，菲涅耳认为很难令人信服。他在 1918 年给阿拉果写信，指出这种解释不可取。为了使两个实验的结果能够协调，他提出了部分曳引假说，即在透明物体中，以太可以部分地被这一物体拖曳。他再假设透明物体的折射率决定以太的密度，令 ρ 与 ρ_1 分别表示真空中和透明物体中以太的密度，假设这些密度与折射率的平方成正比，则：

$$\rho / \rho_1 = 1/n^2 = c_1^2/c^2,$$

或 $\rho_1 = n^2\rho$，

其中 c 为真空中的光速，c_1 为透明物体中的光速，n 为透明物体的折射率。菲涅耳进一步假设，真空中的以太是绝对静止的，透明物体运动时，物体只能带动多于真空的那一部分以太。所以，设透明物体相对于以太的速度为 v，则以太重心的移动速度为：

$$\left(\frac{n^2-1}{n^2}\right)v = \left(1-\frac{1}{n^2}\right)v = kv$$

$k \equiv 1-\frac{1}{n^2}$ 就叫菲涅耳部分曳引系数。

如果透明物体运动速度 v 与光的传播方向一致，则在透明物体中，光的绝对速度等于：

$$c/n + \left(1-\frac{1}{n^2}\right)v.$$

如 n=1，则 k=0，以太完全不受拖曳。这一结果既解释了光行差现象，又解释了阿拉果的实验。

1846 年，英国物理学家斯托克斯（George Gabriel Stokes，1819—1903）对菲涅耳的假设表示异议，他认为把以太分成不动和可动的两部分不如假设物体能够完全拖曳以太，在物体表面附近有一速度逐渐减

慢的区域，在空间中以太完全静止。他进一步假设物体以速度 v 运动，在运动过程中密度为 ρ 的以太从前方进入物体，立即压缩成 ρ_1，然后从后方放出。于是就有质量为 ρv 的以太穿过单位面积，相当于以太有一曳引系数为 $-\rho v/\rho_1$，所以光相对于物体的速度为：

$$\frac{c}{n}-\frac{v\rho}{\rho_1},$$

运动物体中光的绝对速度则为：

$$\frac{c}{n}+v-\frac{v\rho}{\rho_1}=\frac{c}{n}+\frac{n^2-1}{n^2}v,$$

与菲涅耳的结论一致，同样也可解释阿拉果的实验。

斯托克斯这一完全曳引假说似乎比菲涅耳部分曳引假说更合理些，但是由于不久就有实验支持了菲涅耳，所以斯托克斯的假说不大受人重视。

5.3.5　斐索的流水实验

1851 年斐索在流水中比较光速的实验证明了菲涅耳公式。实验原理如图 5—8。两束光从光源 S 发出，经半透射的镀银面 G 反射后，分别通过狭缝 S_1 和 S_2 进入水管，一束顺水流方向，一束逆水流方向，均经反射镜 M 反射，在 S' 处会合发生干涉。观察干涉条纹，可以检定由于受流水曳引形成的光程差。

设光在水中的行程为 2l，水流速度为 v，以太被水流曳引，得到 kv 的速度，则两束光到达 S' 的时间会有差别，计算如下：

$$\Delta t=2l\left[\frac{1}{c/n-kv}-\frac{1}{c/n+kv}\right]$$
$$\approx 4ln^2kv/c^2$$

条纹移动

$$\delta=\frac{c}{\lambda}\Delta t\approx 4ln^2kv/\lambda c$$

■图 5–8 斐索的流水实验

斐索的数据为：光的波长 $\lambda=5.26\times10^{-7}$ 米（黄光），l=1.487 米，水的 n=1.33，v=7.059 米／秒，观察到条纹平均移动 δ=0.23 条。用菲涅耳部分曳引系数 $k=1-\frac{1}{n^2}$ 计算，预期值为 $\delta'=0.2022$ 条，斐索作出结论：“两者接近相等。”

5.3.6　霍克实验

菲涅耳的部分曳引假说在 1868 年又一次得到霍克（Hoek）的实验所证实。实验原理如图 5–9。他用半透射的镀银面 M 将光源 S 发出的单色光分成两束，1 束经 M 反射，由 M_3、L、M_2、M_1 再回到 M；另 1 束透射过 M，由 M_1、M_2、L、M_3 也回到 M。两路光汇合后，在望远镜中产生干涉条纹。L 是一段盛水的玻璃管，两束光以相反的方向通过。设–v 表示以太相对于

实验室的速度，k 为水流（水随整个仪器在运动！）对以太的曳引系数，则对于光束 1，通过长 l 的玻璃水管和长 l 的空气柱，所需时间为：

$$t_1 = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{\left(\frac{c}{n}\right) + kv - v},$$

光束 2 沿相反方向所需时间为：

$$t_2 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{\left(\frac{c}{n}\right) + v - kv},$$

实验证明：整个仪器转 180°，光的干涉条纹没有变化，可见

$$t_1 = t_2。$$

■图 5–9 霍克实验

从上两式中可得：在v/c的精度内，有$k = 1 - \frac{1}{n^2}$。于是霍克用零值法直接证明了曳引系数不是 0，也不是 1，而是菲涅耳的假设。

菲涅耳的部分曳引假说一再得到实验证实，使它成了以太理论的重要支柱。但由它引出的另一条结论，却始终未见分晓。那就是指的当 n=1 时，曳引系数$k = 1 - \frac{1}{n^2} = 0$，以太应处处静止。物体在以太中运动，从物体上看，就好像以太在漂移。地球沿轨道绕太阳运转，也必沿相反方向形成以太风。这就给人们提供一种可能的途径，通过测量以太相对于地球的漂移速度，来证实以太的存在和探求以太的性质。

5.3.7　麦克斯韦的建议

直到 1879 年还没有一个实验能测出上述漂移速度。麦克斯韦很关心这件事，他在为《大英百科全书》撰写的《以太》条目中写道[①]：如果可以在地面上从光由一站到另一站所经时间测到光速，那么我们就可以比较相反方向所测速度，来确定以太相对于地球的速度。然而实际上地面测光速的各种方法都取决于两站之间的往返行程所增加的时间，以太的相对速度等于地球轨道速度，由此增加的时间仅占整个传播时间的亿分之一，所以的确难以观察。”

麦克斯韦建议用罗迈的方法从天体的运动观测这一效应。1879 年 3 月 19 日，他写信给美国航海历书局的托德（D.P.Todd），询问地球围绕太阳运行于不同部位时，观测到的木星卫蚀有没有足够的精度来确定地球的绝对运动。信中又一次提到，“地面上测量光速的方法，光沿同样的路径返回，所以地球相对于以太的速度对双程时间的影响取决于地球速度与光速之比的平方（v/c）^{2}，这个量太小，实难以测出。”

这封信被迈克耳孙（Albert Abraham Michelson， 1852—1931）读

---

① J.C.Maxwell,ScientificPapers,vol.2Dover,1952,p.763.

到了。这时他正在托德所在的美国航海历书局工作，协助这个局的局长纽科姆（Simon Newcomb， 1835—1909）进行光速测定。麦克斯韦的信件激励他设计出了一种新的干涉系统，用两束相干的彼此垂直的光比较光速的差异，从而对以太漂移速度进行检测。灵敏度达到了麦克斯韦要求的量级：亿分之一。

5.3.8　迈克耳孙的干涉仪实验

迈克耳孙当时是美国安那波利斯（Annapolis）海军学院的一名物理教师，擅长光学测量。1879 年靠纽科姆的帮助，赴欧洲学习。1880 年，他在柏林大学的赫姆霍兹实验室，利用德国光学仪器生产发达的优越条件，创造性地进行了干涉仪实验。光路如图 5–10。光源 S 发出的光，经半透射的 45 ° 镀银面 M，分成互相垂直的两束光 1 和 2。透射光束 1 经反射镜 M_1 反射，返回 M 后再反射到望远镜 T 中；反射光束 2，经反射镜 M_2 反射后也返回 M，再穿过 M 到达望远镜 T。两束光在望远镜中发生干涉。设以太的漂移速度为 v，v 与 l_1 臂平行，与 l_2 臂垂直，则光束 1 从 M 经 M_1 回到 M 的过程所需时间为：

$$t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = \frac{2l_1}{c}\left(\frac{1}{1-v^2/c^2}\right) \qquad (5-1)$$

■图 5–10 迈克耳孙干涉仪原理图

设光束 2 从 M 经 M_2 再回到 M 所需时间为 t_2。由于以太正以速度 v 垂直于光路l_2漂移，根据速度合成法则可以推得合速度应为$\sqrt{c^2-v^2}$，（参看图 5–11），所以：

$$t_2 = 2l_2/\sqrt{c^2-v^2} \qquad (5-2)$$

两束光到达望远镜的时间差为：

$$\begin{aligned} \triangle t &= t_1 - t_2 \\ &= \frac{2l_1/c}{1-(v^2/c^2)} - \frac{2l_2/c}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \\ &\approx \frac{2l_1}{c}\left(1+\frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{2l_2}{c}\left(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right) \qquad (5-3) \end{aligned}$$

如将整个仪器转 90 °，时间差变为：

$$\Delta t' \approx \frac{2l_1}{c}\left(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{2l_2}{c}\left(1+\frac{v^2}{c^2}\right) \qquad (5-4)$$

时间差的改变将导致干涉条纹移动 δ 条，由(5–3)及(5–4)式可以求得：

$$\delta = \frac{l_1+l_2}{\lambda c^2}v^2,$$

如果 $l_1=l_2=l$，

则 $\delta = \dfrac{2v^2/c^2}{\lambda/l}$.

■图 5–11 迈克耳孙解释以太漂移影响观测的用图

（由于以太的漂移，光线 ab_1 实际走的路线是 aba_1）

迈克耳孙根据已知数据 地球的轨道速度 v 为 30 千米/秒,$v/c=10^{-4}$，$\lambda=6\times10^{-7}$ 米，l=1.2 米，估算出预期值为 $\delta\approx0.04$ 条纹。

图 5–12 是迈克耳孙最初的干涉仪装置。开始他在柏林大学做实验，因震动干扰太大，无法进行观测，于是改到波茨坦天文台的图 5–12 第一台迈克耳孙干涉仪地下室，实验在 1881 年 4 月完成。可是，出乎迈克耳孙的意料，他看到的条纹移动远比预期值小，而且所得结果与地球运动没有固定的位相关系。于是迈克耳孙大胆地作出结论[①]：“结果只能解释为干涉条纹没有位移。可见，静止以太的假设是不对的。”

5.3.9　1887 年的迈克耳孙-莫雷实验

迈克耳孙 1881 年在波茨坦做的实验遭到人们的怀疑，他自己也觉得不满意。只是由于著名物理学家瑞利（LordRayleigh，1842—1919）和开尔文的鼓励与催促，他才下决心跟莫雷（EdwardWilliamsMorley，1838—1923）合作，进一步改进干涉仪实验。

1886 年开始，他们在美国克利夫兰州的阿德尔伯特（Adel–bert）学院继续实验。为了提高仪器的稳定性和灵敏度，他们把光学系统安装在大石板上，如图 5–13。石板浮在水银槽上，可以自由旋转，改变方位。光路经多次反射，光程延长至 11 米，如图 5–14。他们满怀信心，认为这一次一定有把握测出以太漂移速度。

然而，实验的结果依然如故。他们一共观测了 4 天，得到的曲线比预期值小得多。他们写道[①]：

■图 5–13 迈克耳孙–莫雷实验装置图

■图 5–14 迈克耳孙–莫雷实验光路图

“观测结果用曲线表示如图 5–15。上面是中午观测的曲线，下面是傍晚观测的曲线。虚线代表理论位移的八分之一。从图形可以肯定：即使由于地球与光以太之间的相对运动会使条纹产生任何位移，这位移不可能大于条纹间距的 0.01。”

但根据理论推算，条纹位移最大应为 0.4 个条纹间距。这使他们非常失望，原来还打算在不同季节进行观测，这个想法也取消了。

■图 5–15 迈克耳孙和莫雷得到的实验曲线（λ为光波波长，虚线表示预期值的八分之一，E、S、W、N 分别表示东南西北。）

5.3.10　洛奇的转盘实验

迈克耳孙和莫雷的实验结果发表后，科学界大为震惊。这个零结果对菲涅耳部分曳引假说是一个致命打击。迈克耳孙和莫雷倾向于斯托克斯的完全曳引假说，但是从斯托克斯的完全曳引假说出发，必然会引出

[①] A.A.Michelson,Am.J.Sci,22,1881,p.120.

[①] A.A.Michelson,E.W.Morley,Am.J.Sci.,34c.,1887p.333

一个结论，即在运动物体表面有一速度梯度的区域。如果靠得很近，总可以察觉出这一效应。于是英国物理学家洛奇(OliverJosephLodge,1851—1940）在 1892 年做了一个钢盘转动实验，以试验以太的漂移。他把两块靠得很近（相距仅 1 英寸）的大钢锯圆盘（直径为 3 英尺）平行地安装在电机的轴上，高速地旋转（转速可达 4000 转/分）。一束光线经半镀银面分成相干的两路，分别沿相反方向，绕四方框架在钢盘之间走三圈，再会合于望远镜产生干涉条纹（如图 5–16）。

■图 5–16 洛奇钢盘实验原理图

如果钢盘能带动其附近的以太旋转，则两路光线的时间差会造成干涉条纹的移动。但是，不论钢盘转速如何，钢盘正转与反转造成的条纹移动都是微不足道的。洛奇写道[①]：

“以太被转盘携带的速度不大于转盘的 1/800”。

洛奇的钢盘实验虽然没有迈克耳孙–莫雷实验的影响大，但是它的结果导致人们对斯托克斯的完全曳引假说也失去了信心，迫使人们接受费兹杰惹在 1889 年和洛仑兹(HendrikAntoonLorentz,1853—1928)在 1892 年分别提出的收缩假说。这个收缩假说在推动物理学的革命方面曾经起过承前启后的历史作用。

5.3.11 收缩假说的提出

费兹杰惹是爱尔兰物理学家，他是麦克斯韦理论的积极支持者，也很关心从以太漂移实验对以太进行的各种探讨，所以当迈克耳孙–莫雷实验的零结果发表后，他立即进行了周密的思考。1889 年，他向英国《科学》杂志投寄信件，写道[①]：

“我很有兴趣地读到了迈克耳孙和莫雷先生极其精密的实验结果，这个实验是要判定地球是如何带动以太的，其结果看来跟其它证明了空气中以太只在不大程度上被带动的实验（按：指斐索流水实验或霍克实验）相反。我建议，唯一可能协调这种对立的假说就是要假设物体的长度会发生改变，其改变量跟穿过以太的速度与光速之比的平方成正比。”

然而，由于《科学》杂志不久就停刊了，这封信虽然发表但却鲜为人知，连费兹杰惹本人也不知道这封信是否问世。两年后，费兹杰惹去世，只是由于他的学生特劳顿（F.T.Trouton，1863—1922）多次提到他的工作，人们才知道他比洛仑兹更早就提出了收缩假说。

1892 年，荷兰物理学家洛仑兹在《论地球对以太的相对运动》[②]中独立地提出了收缩假说，他给出了严格的定量关系，文中写道：

“这个实验（指迈克耳孙–莫雷实验）长期使我迷惑，我终于想出了

[①] O.Lodge,Phil.Trans.,184A,1893,p.727.

[①] G.F.FitzGerald，Science，13(1889)p.390.转引自: S.G. Brush, ISIS, 58, 1967, p. 230.

[②] Lorentz,Collected Papers, vol.4,MartinusNijhoff,1937,p.219.

一个唯一的办法来协调它的结论和菲涅耳的理论。这个办法就是：假设固体上两点的联线，如果开始平行于地球运动的方向，当它后来转 90°时就不再保持相同的长度。”

他根据牛顿力学的速度加法规则，推出只要长度的收缩系数α为 $v^2/2c^2$，就可以在（v/c）^{2} 的量级上解释迈克耳孙–莫雷实验的零结果。

1895 年，洛仑兹发表《运动物体中的电和光现象的理论研究》一文，更精确地推出了长度收缩公式：

$$l_{/\!/}=l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}.$$

他认为，这一结果不仅能解释迈克耳孙–莫雷实验，而且可以预言在地球上不可能观察到以太风的各种效应，包括各个量级。他把长度收缩效应看成是真实的现象，并归之于分子力的作用，由此发展成系统的电子论。

也许有必要对历史的真实过程作一点补充。不论是费兹杰惹，还是洛仑兹，都确实从迈克耳孙–莫雷实验的零结果得到了明确的证据，才使他们有把握提出收缩假说。但是，理论的发展不能光靠事实的拼凑，应该有自己的逻辑联系，收缩假说自然也不例外。事实是，早在迈克耳孙–莫雷实验之前，理论家已经在研究动体电动力学的过程中遇到了收缩问题。就是那位推导过电磁质量的亥维赛（参看本章 5.2.3 节），1888 年就根据麦克斯韦电磁场理论，推算出运动电荷 q 的电场与运动速度 v 之间的关系为：

$$E=\frac{q}{r^2}\frac{(1-v^2/c^2)}{(1-v^2/c^2\sin^2\theta)^{3/2}},$$

其中 r 为电场中某点至电荷的距离，c 为光速，θ为 r 与 v 间的夹角。这就相当于电场收缩了。请注意，上式中出现了$\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)$的因子，正是长度收缩因子的平方。

亥维赛曾在 1888 年底将论文寄给费兹杰惹，并和他就电磁场理论和运动电荷问题进行过多次讨论。不久，费兹杰惹就提出了收缩假说。他显然是在电磁理论和迈克耳孙–莫雷实验之间找到了理论和实验的结合点，所以在那封给《科学》的信上，费兹杰惹接着写道：“带电体相对于以太的运动会影响电力，假设分子力也受这一运动的影响，因而物体的大小会改变，看来并非不现实的。”

从收缩假说的起源可以看出，爱因斯坦的狭义相对论和麦克斯韦电磁理论之间存在着内在的渊源关系。

5.3.12　收缩假说的实验验证

长度收缩假说提出之后，理所当然地要受到人们的猜疑，设法用实验进行验证，才可看出长度收缩是不是真实的效应。

1902 年瑞利提出，长度收缩可能导致透明体的密度发生变化，从而产生双折射现象。瑞利估计这个效应也属于二级，即可能小到$\left(\frac{v}{c}\right)^2 \approx$（$10^{-4}$）$^2 \approx 10^{-8}$的量级，但是用光学的办法还是足以察觉的。瑞利亲自做了实验，他用水和亚硫酸氢碳作媒质，实验精度可达 10^{-10}，然而不论是中午还是黄昏，都未观察到双折射。

两年后，美国的光学专家布雷斯（De Witt Bristol Brace，1859—1905）以其精湛的实验技术重复了瑞利的双折射实验。他取一根横梁置于天花板与地板之间，横梁可沿垂直轴自由转动，梁上有一长 4.13 米、宽 15 厘米、深 27 厘米的水槽。光在水中往返通过数次，再送入特制的偏振仪观察。如果光束有极为微小的双折射，就可以从光的强度比较中察觉。灵敏度达 10^{-12}—10^{-13}。

但是，他也没有观察到双折射。看来，长度收缩假说还未能完全弥补实验和理论之间的裂缝。

类似的实验还很多，例如：特劳顿和诺布尔（H.R.Noble）的电容器扭矩实验未能观察到电容器的扭转；洛奇的磁流实验未能观察到磁场对光速的影响；特劳顿和兰金（A.O.Rankine）的电阻实验未能观测到电阻因“长度收缩”而变值，等等。这迫使理论家进一步作出假设，例如，假设电容器悬丝的弹性也会随运动速度作相应的改变；假设组成物质的带电粒子也按同样的比例收缩，……，这样就可以在保留费兹杰惹–洛仑兹收缩假说的前提下解释上述零结果。这些煞费苦心的修补工作引起了思想敏锐的物理学家深思，迫使他们作出最概括的结论：“以太只是一种人为的惯性坐标系，”（Cunningham，1907），以太是不可能探测到的，长度收缩也是不可能探测到的。这一切都为狭义相对论的诞生预备了条件。

§5.4　黑体辐射的研究

热辐射是 19 世纪发展起来的一门新学科，它的研究得到了热力学和光谱学的支持，同时用到了电磁学和光学的新兴技术，因此发展很快。到 19 世纪末，由这个领域又打开了一个缺口，导致了量子论的诞生。

5.4.1　热辐射研究发展简史

1800 年，赫谢尔在观察太阳光谱的热效应时发现了红外线，并且证明红外线也遵守折射定律和反射定律，只是比可见光更易于被空气和其他介质吸收。1821 年，塞贝克（T.J.Seebeck，1780—1831）发现温差电现象并用之于测量温度。1830 年，诺比利（L.Nobili，1784—1835）发明了热辐射测量仪。他用温差电堆接收包括红外线在内的热辐射能量，再用不同材料置于其间，比较它们的折射和吸收作用。他发现岩盐对热

辐射几乎是完全透明的，后来就用岩盐一类的材料做成了各种适用于热辐射的“光学”器件。

与此同时，别的国家也有人对热辐射进行研究。例如：德国的夫琅和费在观测太阳光谱的同时也对光谱的能量分布作了定性观测；英国的丁铎尔（J.Tyndall，1820—1893）、美国的克罗瓦（A.P.P.Crova，1833—1907）等人都测量了热辐射的能量分布曲线。

其实，热辐射的能量分布问题很早就在人们的生活和生产中有所触及。例如：炉温的高低可以根据炉火的颜色判断；明亮得发青的灼热物体比暗红的温度高；在冶炼金属中，人们往往根据观察凭经验判断火候。因此，很早就对热辐射的能量分布问题发生了兴趣。

美国人兰利（Samuel Pierpont Langley，1834—1906）对热辐射做过很多工作。1881 年，他发明了热辐射计，可以很灵敏地测量辐射能量（图 5–17）。为了测量热辐射的能量分布，他设计了很精巧的实验装置，用岩盐作成棱镜和透镜，仿照分光计的原理，把不同波长的热辐射投射到热辐射计中，测出能量随波长变化的曲线，从曲线可以明显地看到最大能量值随温度增高向短波方向转移的趋势（图 5–18）。1886 年，他用罗兰凹面光栅作色散元件，测到了相当精确的热辐射能量分布曲线。

■图 5–17 兰利的热辐射计。他用四个铂电阻丝组成电桥，从检流计测出电阻的温度变化

■图 5–18 兰利的能量分布曲线（横坐标表示光谱位置）

兰利的工作大大激励了同时代的物理学家从事热辐射的研究。随后，普林舍姆（Ernst Pringsheim，1859—1917）改进了热辐射计；波伊斯（Charles Vernon Boys，1855—1944）创制了微量辐射计；帕邢（Friedtich Paschen，1865—1947）又将微量辐射计的灵敏度提高了多倍。这些设备为热辐射的实验研究提供了极为有力的武器。

与此同时，理论物理学家也对热辐射展开了广泛研究。1859 年，基尔霍夫证明热辐射的发射本领 e（v，T）和吸收本领 a（v，T）的比值与辐射物体的性质无关，并提出了黑体辐射的概念。1879 年，斯忒藩（Josef Stefan，1835—1893）总结出黑体辐射总能量与黑体温度四次方成正比的关系：$E=\sigma T^4$。1884 年这一关系得到玻尔兹曼从电磁理论和热力学理论的证明。1893 年，维恩（WilhelmWien，1864—1928）提出辐射能量分布定律：

$$u=b\lambda^{-5}e^{-\alpha/\lambda t} \quad (5-5)$$

这就叫维恩分布定律，其中 u 表示能量随波长 λ 分布的函数，也叫能量密度，T 表示绝对温度，a、b 为两个任意常数。

从公式（5–5）可得维恩位移公式：

$$\lambda_m T=\text{const.} \quad (5-6)$$

即：对应于能量分布函数 u 最大值的波长 λ_m 与温度 T 成反比。

5.4.2 维恩分布定律的研究

维恩是一位理论、实验都有很高造诣的物理学家。他所在的研究单位叫德国帝国技术物理研究所（Physikalisch Technische Rei-chsanstalt），简称 PTR，以基本量度基准为主要任务。当时正值钢铁、化工等重工业大发展的时期，急需高温量测、光度计、辐射计等方面的新技术和新设备，所以，这个研究所就开展了许多有关热辐射的实验。所里有好几位实验物理学家后来对热辐射作出了重大贡献，其中有鲁本斯（Heinrich Rubens，1865—1922）、普林舍姆、卢梅尔（OttoRichardLummer，1860—1925）和库尔班（Ferdi-nandKurlbaum，1857—1927）。

1895 年，维恩和卢梅尔建议用加热的空腔代替涂黑的铂片来代表黑体，使得热辐射的实验研究又大大地推进了一步。随后，卢梅尔和普林舍姆用专门设计的空腔炉进行实验。（本来维恩和卢梅尔合作，后来维恩离开了柏林，就改由普林舍姆和卢梅尔合作）。他们用的加热设备如图 5-19。

■图 5-19 卢梅尔等人用于加热空腔的双壁煤气炉

这时，柏林大学有一位理论物理学家，叫普朗克（MaxPlanck，1858—1947），也对热辐射的研究发生了兴趣。普朗克经常参加 PTR 的讨论会。由于他在热力学领域有深厚造诣，很自然地就接替维恩，成了这群实验物理学家中间的理论核心人物。

维恩分布定律在 1893 年发表后引起了物理学界的注意。实验物理学家力图用更精确的实验予以检验；理论物理学家则希望把它纳入热力学的理论体系。普朗克认为维恩的推导过程不大令人信服，假设太多，似乎是凑出来的。于是从 1897 年起，普朗克就投身于研究这个问题。他企图用更系统的方法以尽量少的假设从基本理论推出维恩公式。经过二三年的努力，终于在 1899 年达到了目的。他把电磁理论用于热辐射和谐振子的相互作用，通过熵的计算，得到了维恩分布定律，从而使这个定律获得了普遍的意义。

然而就在这时，PTR 成员的实验结果表明维恩分布定律与实验有偏差。1899 年卢梅尔与普林舍姆向德国物理学会报告说，他们把空腔加热到 800—1400K，所测波长为 0.2—6μm，得到的能量分布曲线基本上与维恩公式相符，但公式中的常数，似乎随温度的升高略有增加。第二年 2 月，他们再次报告，在长波方向（他们的实验测到 8μm）有系统偏差。图 5-20 是当时他们用来表示偏差的对数曲线。

■图 5-20 卢梅尔和普林舍姆的等色线

根据（5-5）式，应有

$$\ln u=\ln(b\lambda^{-5})-a/\lambda T$$

所以$\ln u \sim \frac{1}{T}$曲线应为一根直线。然而，他们的结果却是温度越高，偏

离得越厉害。

接着，鲁本斯和库尔班将长波测量扩展到 51.2μm。他们发现在长波区域辐射能量分布函数（即能量密度）与绝对温度成正比。

普朗克刚刚从经典理论推导出的辐射能量分布定律，看来又需作某些修正。正在这时，瑞利从另一途径也提出了能量分布定律。

5.4.3 瑞利-金斯定律

瑞利是英国著名物理学家，他看到维恩分布定律在长波方向的偏离，感到有必要提醒人们，在高温和长波的情况下，麦克斯韦–玻尔兹曼的能量均分原理似乎仍然有效。他认为："尽管由于某种尚未澄清的原因，这一原理普遍地不适用，但似乎有可能适用于（频率）较低的模式。"[1]于是他假设在辐射空腔中，电磁谐振的能量按自由度平均分配。由此得出：

$$u \propto v^2 T \quad (5\text{–}7)$$

或 $u \propto \lambda^{-4} T$（5–8）

这个结果要比维恩辐射公式更能反映高温下长波辐射的情况，因为根据（5–5）式，当 $\lambda T \to \infty$ 时，$u = b\lambda^{-5} e^{-\alpha/\lambda T} \propto \lambda^{-5}$，与温度无关，可是实验证明，此时 u 与 T 成正比。

瑞利显然注意到了，当 $\lambda \to 0$ 或 $v \to \infty$ 时，他的公式会引出荒谬结果，因为 $u \propto \lambda^{-4} T$ 要趋向无穷大。于是，他在公式（5–8）中添了一个指数因子 $e^{-C_1/\lambda T}$，认为这样可以兼顾到短波方向，得：

$$u = C_1 \lambda^{-4} T e^{-c_2/\lambda T} \quad (5\text{-}9)$$

瑞利申明：他的方法"很可能是先验的，"他"没有资格判断（5–8）式是否代表观测事实。希望这个问题不久就可以从投身这一课题的卓越实验家之手中获得答案。"

1905 年，瑞利计算出了公式（5–7）的比例常数，但计算中有错。金斯（J.H.Jeans，1877—1946）随即撰文予以纠正，得：

$$u = \frac{8\pi v^2}{c^3} \cdot kT \qquad (5-10)$$

于是这公式就称为瑞利–金斯定律。由于它代表了能量均分原理在黑体辐射问题上的运用，所以常常被人引用。

应该肯定，1900 年瑞利提出上述公式对黑体辐射的研究有益，因为它代表了一种极端情况，有利于普朗克提出全面的辐射公式。

5.4.4 普朗克辐射定律

普朗克是理论物理学家，但他并不闭门造车，而是密切注意实验的进展，并保持与实验物理学家的联系。正当他准备重新研究维恩分布定律时，他的好友鲁本斯告诉他，自己新近红外测量的结果，确证长波方

---

[1] Rayleigh,Phil.Mag.(5)49(1900),p.539.

向能量密度 u 与绝对温度 T 有正比关系，并且告诉普朗克，“对于（所达到的）最长波长（即 51.2μm），瑞利提出的定律是正确的。”这个情况立即引起了普朗克的重视。他试图找到一个公式，把代表短波方向的维恩公式和代表长波方向的实验结果综合在一起，很快就得到了：

$$u = \alpha\lambda^{-5} \cdot \frac{1}{e^{b/\lambda T} - 1} \qquad (5-11)$$

这就是普朗克辐射定律，和维恩公式相比，仅在指数函数后多了一个（–1）。

鲁本斯得知这一公式后，立即把自己的实验结果和理论曲线比较，发现完全符合。于是，两人就在 1900 年 10 月 19 日向德国物理学会作了报告。普朗克的题目叫：《维恩光谱方程的改进》，报告了他得到的经验公式。

作为理论物理学家，普朗克当然并不满足于找到一个经验公式。实验结果越是证明他的公式与实验相符，就越促使他致力于探求这个公式的理论基础。他以最紧张的工作，经过两三个月的努力，终于在 1900 年底用一个能量不连续的谐振子假设，按照玻尔兹曼的统计方法，推出了黑体辐射公式（参看§7.2）。

5.4.5 紫外灾难

普朗克的能量不连续谐振子假设也叫能量子假设，这个假设的提出对物理学有划时代的意义。但是，坚持经典理论的物理学家还大有人在，怀疑和非难接踵而来。例如，1908 年，作为物理学泰斗的洛仑兹竟在罗马第四届国际数学大会上发表演讲，对普朗克的量子假设表示怀疑，同时对瑞利–金斯的理论表示支持，于是在物理学界中引起了很大的思想混乱。后来，在一些物理学家的批评下，洛仑兹承认了自己的错误，并站到了普朗克这一边。

经典物理学家们的错误实质在于不适当地把只在极端情况下证明有实际意义的理论当作普遍真理，力图推广到全过程，甚至连出现了荒谬的结果也在所不顾。这不能不引起某些实验家和思想敏锐的理论家的反对。1908 年，卢梅尔和普林舍姆在驳斥洛仑兹的文章中举了一个很浅显的例子：熔融的钢（T≈1700K）发出强得令人眼花的光，如果按瑞利–金斯的理论，辐射能量密度与绝对温度成正比，则在室温（T≈300K）下，黑体辐射能量理应为高温下的 300/1700≈1/6，但事实显然并非如此；1911 年，埃伦费斯特（F.A.Ehrenfest，1879—1952）用“紫外灾难”来形容经典理论的困境。因为按照瑞利–金斯的理论，辐射能量密度与频率的平方成正比，则在高频的情况下能量就要趋于无限大，或者说，在紫色一端趋于发散。这当然是荒谬的。经典理论的维护者千方百计要弥补漏洞，但都无济于事。在那世纪之交的转折关头，在他们看来，物理学面临着一场深刻的“危机”。

§5.5 经典物理学的“危机”

关于经典理论的“危机”和它的维护者所持的态度，有一个事例，被人们作为典型经常引证，这就是开尔文的“两朵乌云”。开尔文在19世纪后半叶，对经典物理学作过许多贡献。1900年，这时他已76岁了，是一位德高望重的物理学界老前辈。这一年4月27日，他在英国皇家研究所（Royal Institution）发表了一篇讲演[①]，题为：《在热和光动力理论上空的19世纪乌云》，开头的一段话是这样说的：

“动力学理论断言热和光都是运动的方式，现在这一理论的优美性和明晰性被两朵乌云遮蔽得黯然失色了。第一朵乌云是随着光的波动论而开始出现的。菲涅耳和托马斯·杨研究过这个理论，它包括这样一个问题：为什么地球能够穿过本质上是光以太这样的弹性固体而运动呢？”

开尔文回顾了以太的各种学说，并阐述了自己的看法。他认为菲涅耳和托马斯·杨的学说不能完满解释与以太有关的各种现象，物体在以太中，必然跟以太有相互作用。“如果把以太看成是可伸可缩的固体，就不难回答这一问题。我们只要假设原子对以太会产生力，靠这个力的作用，在原子占据的空间（以太）被浓缩和稀释。”他肯定了费兹杰惹和洛仑兹的收缩假说，认为已经摆脱了困境，迈克耳孙–莫雷实验的“结果不能否定以太通过地球所占空间的自由运动。”

不过，开尔文并不因此而表示乐观，他宣称：“恐怕我们还必须把第一朵乌云，看成是很稠密的。”

接着，开尔文以大量篇幅讨论第二朵乌云，这是指的能量均分原理遇到了麻烦。他认为这朵乌云应该驱散，二十多年来，麦克斯韦、玻尔兹曼、瑞利等人总希望维护能量均分原理，“避免破坏普遍结论的简单性。”但是实际上不可能有这种简单性。开尔文提到他自己就在十年前向能量均分原理提出过质疑。经过一番论证之后，开尔文宣称：“要达到所需结果，最简单的途径就是否定这一结论，这样就可以在20世纪开始之际，使……这朵乌云消失。”

有人说，开尔文关于两朵乌云的演讲预见到物理学正酝酿着一场伟大的革命。这种说法恐怕不大符合事实，但是他这篇演讲确实反映了当时物理学家的普遍情绪，认为物理学正处于危机之中。

其实，物理学面临的不是危机，而是一场伟大的革命。实验上一系列新发现，跟经典物理学的理论体系产生了尖锐的矛盾，暴露了经典物理理论中的隐患，指出了经典物理学的局限性。物理学只有从观念上、从基本假设上、以及从理论体系上来一番彻底的变革，才能适应新的形

---

① Kelvin,Phil.Mag.(6)2(1901),p.1.

势。

由于这些变革，物理学面临大发展的局面，请看：

(1)电子的发现，打破了原子不可分的传统观念，开辟了原子物理学的崭新领域；

(2)放射性的发现，导致了放射学的研究，为原子核物理学作好必要的准备；

(3)以太漂移的探索，使以太理论处于重重矛盾之中，为从根本上抛开以太存在的假设、创立狭义相对论提供了重要依据；

(4)黑体辐射的研究导致了普朗克黑体辐射定律，由此提出了量子假说，为量子理论的建立打响了第一炮。

总之，在世纪之交的年代里，物理学处于新旧交替的阶段。所谓新旧交替，并不是指旧的经典物理学完全被新的物理学取代，而是指物理学在原有的基础上扩展，从低速宏观的领域扩展到高速和微观的领域。对于低速宏观的领域，经典物理学仍然是有效的。

第六章　相对论的建立和发展

§6.1　历史背景

相对论是现代物理学的重要基石。它的建立是 20 世纪自然科学最伟大的发现之一，对物理学、天文学乃至哲学思想都有深远影响。

相对论是科学技术发展到一定阶段的必然产物，是电磁理论合乎逻辑的继续和发展，是物理学各有关分支又一次综合的结果。

在第五章中我们已经介绍了以太漂移实验的否定结果。这些结果促使人们对以太和绝对坐标系的存在产生怀疑。表 6–1 列举了 1908 年以前著名的一些以太漂移实验。

19 世纪后半叶，光速的精确测定为光速的不变性提供了实验依据。

与此同时，电磁理论也为光速的不变性提供了理论依据。1865 年麦克斯韦在《电磁场的动力学理论》一文中，就从波动方程得出了电磁波的传播速度。并且证明，电磁波的传播速度只取决于传播介质的性质。

1890 年赫兹把麦克斯韦电磁场方程改造得更为简洁。他明确指出，电磁波的波速（即光速）c，与波源的运动速度无关。可见，从电磁理论出发，光速的不变性是很自然的结论。然而这个结论却与力学中的伽利略变换抵触。

为了解决这些矛盾，洛仑兹在 1892 年一方面提出了长度收缩假说，用以解释以太漂移的零结果；另一方面发展了动体的电动力学。他假设以太是绝对静止的，从他的电磁理论推出了菲涅耳曳引系数。随后，又在 1895 年与 1904 年先后建立一阶与二阶变换理论，他力图使电磁场方程适用于不同的惯性坐标系。然而尽管他的理论能够解释一些理象，（例如能解释为什么探测不到地球相对于以太的运动），但却是在保留以太的前提下，采取修补的办法，人为地引入了大量假设，致使概念繁琐，理论庞杂，缺乏逻辑的完备性和体系的严密性。

表 6–1 著名的以太漂移实验[①]

[①] 参看：郭奕玲、沈慧君，著名经典物理实验，北京科技出版社，1991 年，第二十三至二十七章。

光行差实验：布拉德雷(1728)，阿拉果(1810)，（爱里 1871 ）。

部分曳引实验：斐索(1851)，霍克(1868)，迈克耳孙-莫雷(1886)，肯定了菲涅耳部分曳引假说。

偏振面旋转实验：法拉第（ 1845 年发现），玛斯卡特(1872)，瑞利(1902)，布雷斯(1905)，洛仑兹理论预计有 10^{-4} 的效应，实验未得到。

干涉仪实验：迈克耳孙(1881)，迈克耳孙-莫雷(1887)，有利于斯托克斯完全曳引假说。

转盘实验：洛奇(1892)。

磁流实验：洛奇(1897)，对拉摩理论有很大影响。

双折射实验：瑞利(1902)，布雷斯(1904)，精度达 10^{-13} 。

电容器扭转实验：特劳顿与诺伯尔(1903)。

电阻实验：特劳顿与兰金(1908)。

单极感应实验：法拉第(1831 年发现），勒赫特(1895)，找不到统一的解释。

法国著名科学家彭加勒（HenriPoincarè）对洛仑兹理论起过积极作用。他在 1895 年就对用长度收缩假说解释以太漂移的零结果表示不同看法。他提出了相对性原理的概念，认为物理学的基本规律应该不随坐标系变化。他的批评促使洛仑兹提出时空变换的方程式。1904 年彭加勒正式表述了相对性原理。他在一次演说中讲道：“根据这个原理，无论对于固定的观察者还是对于正在作匀速运动的观察者，物理定律应该是相同的。因此没有任何实验方法可以用来识别我们自身是否处于匀速运动之中。”彭加勒还对洛仑兹理论进行加工整理，使它的数学形式更加简洁。然而彭加勒也没有跳出绝对时空观的框架。他们已经走到了狭义相对论的边缘，却没有能够创立狭义相对论。历史的重任只能由没有传统思想包袱而有独立批判精神的年轻学者爱因斯坦来承担。

§6.2　爱因斯坦创建狭义相对论的经过

爱因斯坦是德国人，有犹太血统，1900 年毕业于瑞士苏黎世工业大学，1901 年入瑞士国籍，大学毕业两年后才在伯尔尼瑞士专利局找到技术员的工作。就在专利局工作期间，1905 年头几个月一连发表了四篇重要论文，分别在辐射理论、分子运动论和力学与电动力学的基础理论等三个不同的领域提出了新的见解。其中《论动体的电动力学》一文更具有划时代的意义，文中第一次提出了崭新的时间空间理论，一举解决了光速的不变性与速度合成法则之间的矛盾以及电磁理论中的不对称等难题。爱因斯坦把这个理论称为相对性理论，简称相对论，后来又叫狭义

相对论。狭义相对论是爱因斯坦伟大的一生中取得的第一项重大成果，是他在前人的基础上经过长期的酝酿和探索才取得的。我们在学习相对论时，很自然要问，为什么是爱因斯坦而不是别人创建了狭义相对论？爱因斯坦受到过那些启发，抓住了什么关键，找到了什么突破口，才取得如此重大的成果的呢？

根据爱因斯坦 1946 年写的《自述》[①]和 1922 年在日本京都大学的讲演：《我是怎样创立狭义相对论的？》[②]以及其它资料，我们可以追溯他走过的道路。早在 16 岁（1895 年）时，爱因斯坦就开始思考这样一个问题：“如果我以速度 c（真空中的光速）追随光线运动，我应当看到这样一条光线就好象一个在空中振荡着而停滞不前的电磁场。可是无论是依据经验，还是按照麦克斯韦方程，看来都不会有这样的事情。”这是一个悖论，实际上包含了狭义相对论的萌芽。

爱因斯坦对这个问题的思考，经历了很长的过程。他回忆说：“最初当我有这个想法时，我并不怀疑以大的存在，不怀疑地球相对以太的运动”。甚至他还设想用热电偶做一个实验，比较沿不同方向的两束光线所放出的热量。

不久爱因斯坦得知迈克耳孙–莫雷实验的零结果。他由此认识到，地球相对于以太的运动是不能用任何仪器测量的。他继续回忆说：“如果承认迈克耳孙的零结果是事实，那么地球相对于以太运动的想法就是错的，这是引导我走向狭义相对论的第一步。”

后来，爱因斯坦读到了洛仑兹 1895 年的论文，对洛仑兹方程发生了兴趣。他很欣赏洛仑兹方程不但适用于真空中的参照系，而且适用于运动物体的参照系。他试图用洛仑兹方程讨论斐索的流水中光速实验。当时他坚信麦克斯韦和洛仑兹电动力学方程是正确的，但是进一步推算，发现要保持这些方程对动体参照系同样有效，必然导致光速不变性的概念，而光速的不变性明显地与力学的速度合成法则相抵触。

为什么这两个概念会相互矛盾呢？爱因斯坦苦思不得其解。起初他想修改洛仑兹的观念，以解决这个矛盾，结果白白花了一年时间，没有取得进展。

经过十年的思考，终于在 1905 年的一天，他突然找到了解决问题的关键。他在那次讲演中这样形容当时的情景：

“为什么这两个观念相互矛盾呢？我感到这一难题相当不好解决。我花了整整一年的时间，试图修改洛仑兹的思想，来解决这个问题，但是却徒劳无功。

“是我在伯尔尼的朋友贝索偶然间帮我摆脱了困境。那是一个晴朗

[①] 许良英等编译，爱因斯坦文集，第 1 卷，商务印书馆，1977 年，p.1.

[②] A.Einstein,Phys.Tod.,35(1982-Aug.)p.45.

的日子，我带着这个问题访问了他，我们讨论了这个问题的每一个细节。忽然我领悟到这个问题的症结所在。这个问题的答案来自对时间概念的分析，不可能绝对地确定时间，在时间和信号速度之间有着不可分割的联系。利用这一新概念，我第一次彻底地解决了这个难题。”

不出五个星期，（1905 年 6 月），爱因斯坦就写好了那篇历史性文献《论动体的电动力学》[①]，1905 年 9 月发表在著名的德文杂志《物理学年鉴》上。在这篇论文中，爱因斯坦十分果断地把相对性原理和光速不变原理这两条看起来似乎矛盾的设想放在一起作为基本出发点。他称之为两条公设，内容如下：

“1．物理体系的状态据以变化的定律，同描述这些状态变化时所参照的坐标系究竟是两个在互相匀速移动着的坐标系中的那一个并无关系，（相对性原理）。”

“2．任何光线在静止的坐标系中都是以确定的速度 v 运动着，不管这道光线是由静止的还是运动的物体发射出来的，（光速不变原理）。”

爱因斯坦明确指出：在他的理论里，以太的概念将是多余的，因为这里不需要特设的绝对静止参照系。爱因斯坦不是象洛仑兹那样，事先假设某种时空变换关系，而是以这两个公设为出发点，推导出时空变换关系。他非常简洁地建立了一系列新的时空变换公式之后，立即推导出了运动物体的“长度收缩”、运动时间的“时钟变慢”、同时性的相对性以及新的速度合成法则等等，由此形成一套崭新的时空观。

爱因斯坦之所以能够如此利落地摒弃旧的一套时空观，是因为他经过十年的思索，查考了一系列物理学中的矛盾，总结了各方面的事实，充分认识到绝对空间和绝对时间是人为的，多余的概念。

从那篇历史文献可以看出，爱因斯坦并不只是依据以太漂移实验，他首先是从麦克斯韦电动力学的不对称性提出问题的。

关于他对动体电动力学的注意，爱因斯坦本人在 1919 年写的一篇从未发表过的手稿中讲道[①]：

“在构思狭义相对论的过程中，关于法拉第电磁感应（实验）的思考对我起了主导作用。按照法拉第的说法，当磁体对于导体回路有相对运动时，导体回路就会感应出电流。不管是磁体运动还是导体回路运动，结果都一样。依照麦克斯韦-洛仑兹理论，只需计及相对运动。然而，对这两种情况理论上的解释截然不同……想到面对着的竟是两种根本不同的情况，我实在无法忍受。这两种情况不会有根本的差别，我深信只不过是选择参考点的差别。从磁体看，肯定没有电场；可是从导体回路看，却肯定有电场。于是电场的有无就成为相对的了，取决于所用坐标系的

[①] 许良英等编译，爱因斯坦文集，第 2 卷，商务印书馆，1979，p.83

[①] 转引自 G. Holton, Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein Harvard, 1973, p.363.

运动状况。只能假设电场与磁场的总和是客观现实。电磁感应现象迫使我假设（狭义）相对性原理。必须克服的困难在于真空中光速的不变性，我最初还不得不想要放弃它。只是在经过若干年的探索之后，我才注意到这个困难在于运动学上一些基本概念的任意性上。”

这里所谓的任意性大概是指“同时性”这类概念。

爱因斯坦追求的目标是普遍性的自然法则。他在《自述》中写道：

“不论是力学还是热力学（除非在极限情况下）都不能要求严格有效。渐渐地我对那种根据已知事实用构造性的努力去发现真实定律的可能性感到绝望了。我努力得愈久，就愈加失望，也就愈加确信，只有发现一个普遍形式的原理，才能使我们得到可靠的结果。我认为热力学就是放在我面前的一个范例。”

哲学的思考也是引导爱因斯坦前进的重要因素。在《自述》中他这样讲道：“只要时间的绝对性或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在潜意识里，任何想要令人满意地澄清这个悖论的尝试都是注定要失败的。清楚地认识到公理以及它的任意性实际上就意味着问题的解决。对于发现这个中心点所需要的批判思想，就我的情况来说特别是由于阅读了戴维、休谟、恩斯特、马赫的哲学著作而得到决定性的进展。”

爱因斯坦少年时期就对哲学有兴趣。康德的《纯粹理性批判》，马赫的《力学史评》都给了他深刻的影响。1902 年前后，爱因斯坦和几个年轻朋友组成“奥林比亚科学院”每晚聚在一起，研读斯宾诺莎、休谟、彭加勒等人的科学和哲学著作。斯宾诺莎关于自然界统一的思想，休谟的时空观，马赫对牛顿绝对时空观的批判都引起爱因斯坦极大的兴趣。

爱因斯坦在《论动体的电动力学》一文的最后，推导出了电子质量随速度变化的关系和电子的动能公式，并由电子速度等于光速 c 时动能变为无穷大的结果预言电子速度不可能大于光速。

1905 年晚些时候，爱因斯坦又发表了一篇论文，题为《物体的惯性同它所含的能量有关吗？》，第一次提出了相对论的质能转化关系。“物体质量是它所包含的能量的量度。”“如果能量改变 L，则质量也要同时改变 L/（9×10^{20}）（即 L/c^2，这里用的是 CGS 单位）。”

§6.3　狭义相对论被人们接受的经过

由于人们的思想长期受到传统观念的束缚，一时难于接受崭新的时空观，爱因斯坦的论文发表后，相当一段时间受到冷遇，被人们怀疑甚至遭到反对。在法国，直到 1910 年几乎没有人提到爱因斯坦的相对论。在实用主义盛行的美国，最初十几年中也没有得到认真对待。迈克耳孙至死（1931 年）还念念不忘“可爱的以太”，认为相对论是一个怪物。英国也不例外，在人们的头脑里以太的观念太深了，相对论彻底否定以

太的必要性，被人们看成是不可思议的事。当时甚至掀起了一场“保卫以太”的运动。J.J.汤姆生在 1909 年宣称：“以太并不是思辨哲学家异想天开的创造，对我们来说，就象我们呼吸空气一样不可缺少”[①]。1911 年美国科学协会主席马吉（M.F.Magie）说：“我相信，现在没有任何一个活着的人真的会断言，他能够想象出时间是速度的函数。”被爱因斯坦誉为相对论先驱的马赫，竟声明自己与相对论没有关系，“不承认相对论”。有一位科学史家叫惠特克（S.E.Whittaker）在写相对论的历史时，竟把相对论的创始人归于彭加勒和洛仑兹，认为爱因斯坦只是对彭加勒和洛仑兹的相对论加了一些补充。

爱因斯坦是 1922 年获诺贝尔物理奖的。不过不是由于他建立了相对论，而是“为了他的理论物理学研究，特别是光电效应定律的发现”。诺贝尔物理奖委员会主席奥利维亚（Aurivillus）为此专门写信给爱因斯坦，指明他获奖的原因不是基于相对论，并在授奖典礼上解释说：因为有些结论目前还正在经受严格的验证。

普朗克和闵可夫斯基（H.Minkowski）可以说是支持相对论的代表。正是普朗克，当时作为《物理学年鉴》的主编，认识到爱因斯坦所投论文的价值，及时地予以发表。所以人们常说，普朗克有两大发现，一是发现了作用量子，二是发现了爱因斯坦。他的学生劳厄在 1911 年就致力于宣传相对论，大概也是受了他的影响。闵可夫斯基本是爱因斯坦的老师，1908 年发表《空间与时间》一文，把空时-时间合并成四维空间，重新处理了相对论的基本方程，把洛仑兹变换看成是空间-时间四维坐标的变换。这样就可以使相对论的规律以更加简洁的形式表达出来。

关于狭义相对论受人们怀疑和反对的情况，可以举电磁质量的实验检验来作些说明（注）[②]。狭义相对论有一重要结果，就是预言电子质量会随运动速度增长。从经典电磁理论出发也可以得到类似的结论，因为运动电荷会产生磁场，电磁场的能量增大，相当于质量也增大。经典电磁理论家阿伯拉罕（M.Abraham）假设电子是一个有确定半径的钢性带电小球，它在运动中产生的磁场引起电磁质量，由此推出了电子的质量公式。1901 年，实验物理学家考夫曼用β射线的高速电子流进行实验，证实电子的质量确实是随速度变化的。洛仑兹到 1904 年则根据收缩假说也推出了电子质量公式。后来证明洛仑兹公式与狭义相对论的结果一致。1906 年，考夫曼宣布，他的量度结果证实了阿伯拉罕的理论公式，而“与洛仑兹-爱因斯坦的基本假定不相容”。这件事一度竟成了否定相对论的重要依据。在这一事实面前，洛仑兹失望了，他表示，“不幸我的电子变

[①] S.Goldberg,HSPS,vol.2(1970),p.88.

[②] 注参看 5.2.3 节。

形假说与考夫曼的新结果矛盾，我只好放弃它了。”然而，爱因斯坦却持另一种态度，他在 1907 年写文章表示，相信狭义相对论是经得起考验的，在他看来那些理论在很大的程度上是由于偶然碰巧与实验结果相符。果然，一年后布雪勒（A.H.Bucherer）用改进了的方法测电子质量，得到的结果与洛仑兹-爱因斯坦公式符合甚好。以后许多实验都证明，狭义相对论的结果是正确的。可是，观念的改变不是一朝一夕之事。1911 年索尔威会议召开，由于爱因斯坦在固体比热的研究上有一定影响，人们才注意到他在狭义相对论方面的工作。只是到了 1919 年，爱因斯坦的广义相对论得到了日全食观测的证实，他成为公众注目的人物，狭义相对论才开始受到应有的重视。

§6.4 广义相对论的建立

狭义相对论建立以后，爱因斯坦并没有止步。他认为狭义相对论还有许多问题没有解决。例如：为什么惯性坐标系在物理学中比其他坐标系更为优越？为什么惯性质量随能量变化？为什么一切物体在引力场中下落都具有同样的加速度？刚刚经受住考验的狭义相对论，为什么一用到引力场中就遇到了矛盾？爱因斯坦感到极大的疑惑。他坚信自然界的和谐和统一，认为要么对惯性坐标系为什么会特别优越作出解释，要么放弃惯性坐标系的特殊优越地位。经过一段时间的尝试，爱因斯坦在 1907 年认识到，“在狭义相对论的框子里，是不可能有令人满意的引力理论的。”

6.4.1 引力质量与惯性质量的等价性

早在伽利略时代，人们就掌握了这样一个基本事实，即一切物体在自由下落时具有相同的加速度。如果用 A、B 表示两个物体，则根据牛顿第二定律和万有引力定律可分别得：

$m_{惯A}\cdot\alpha_A=m_{引A}\cdot GM/R^2$

$m_{惯B}\cdot\alpha_B=m_{引B}\cdot GM/R^2$

其中 G 为引力常数，M、R 为地球的质量与半径，$m_{惯}$表示惯性质量，$m_{引}$表示引力质量，a 表示加速度。

既然 $a_A=a_B$ 必有

$m_{惯A}/m_{引A}=m_{惯B}/m_{引B}=$常数

牛顿在他的《自然哲学的数学原理》里，描述了他自己做过的单摆实验，实验证明惯性质量与引力质量之差不超过千分之一，他承认这一事实，并且假定惯性质量与引力质量相等。

然而，不论是伽利略、牛顿还是后来人，都没有能够对这一事实作

[①] A.I. Miller, Einstein's Special Theory of Relativity, Addison-welley,1981,p.47。

[①] 爱因斯坦文集，第 1 卷，商务印书馆，1977，第 629 页。

出解释。

1889 年，厄缶（EÖtvÖs）做了极其灵敏的扭秤实验，比较引力质量和惯性质量。他利用扭秤两端重物所受到的地球引力和由于地球自转产生的惯性离心力，确定两者的偏差不超过 5×10^{-8}。惯性质量与引力质量等价的事实，后来成了广义相对论的重要依据。

6.4.2 两个基本原理

爱因斯坦 1922 年回忆他创建广义相对论的过程时讲道:当他正在思考如何突破狭义相对论的框架，以解决惯性与重量之间的不协调时，一个突然的闪念出现了。他说：“有一天，突破口突然找到了。当时我正坐在伯尔尼专利局办公室里，脑子里突然闪现了一个念头：如果一个人正在自由下落，他决不会感到他有重量。我吃了一惊，这个简单的思想实验给我的印象太深了。它把我引向了引力理论。我继续想下去：下落的人正在作加速运动，可是在这个加速参照系中，他有什么感觉？他如何判断面前所发生的事情？”

爱因斯坦 1933 年在《广义相对论的来源》一文中，这样写道：“在引力场中一切物体都具有同一加速度，这条定律也可以表述为惯性质量与引力质量相等的定律，它当时就使我认识到它的全部重要性。我为它的存在感到极为惊奇，并猜想其中必定有一把可以更加深入地了解惯性和引力的钥匙。”1907 年，爱因斯坦发表第一篇有关广义相对论的论文：《关于相对论原理和由此得出的结论》，文中首次提出等价原理（等效原理）的假设，即：“引力场同参照系的相当的加速度在物理上完全等价。”文中还提出了另一条基本原理，即广义相对性原理，他写道：“迄今为止，我们只把相对论原理，即认为自然规律同参照系的状态无关这一假设应用于非加速参照系。是否可以设想，相对性运动原理对于相互作加速运动的参照系也依然成立？”他假设可以用一个均匀加速的参照系来代替均匀引力场。

跟狭义相对论的两条看来似乎矛盾的基本公设一样，广义相对论的两条基本原理也存在一定的矛盾。爱因斯坦为了克服这一困难，花了好几年的时间，寻找解决办法。正如他在《自述》中说的：“其主要原因在于：要使人们从坐标必须具有直接度规意义这一观念中解放出来，可不是那么容易。”

所谓直接度规，指的是坐标差等于可量度的长度或时间。这是又一条自古以来的传统观念。现在必须用柔性度规来代替直接度规，也就是要把洛仑兹变换推广为非线性变换。

爱因斯坦研究广义相对论，经历了一个比建立狭义相对论还更漫长的探索道路。从 1907 年到 1916 年的九年时间，爱因斯坦先后发表了好

[①] 爱因斯坦文集，第 1 卷，商务印书馆，1977，第 320 页。

几篇论文，使广义相对论逐步完备。他遇到的主要困难是缺乏合适的数学工具。

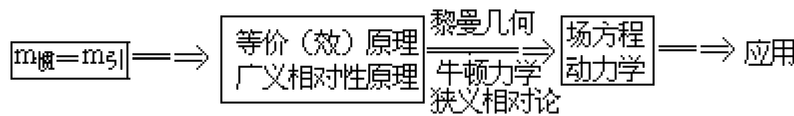
1913 年，爱因斯坦与格罗斯曼（M.Grossmann）合作，建立了引力的度规场理论，他们联名发表了《广义相对论和引力论》，系统地论述了广义相对论的物理原理和数学方法。他们引入了黎曼张量，把平直空间的张量运算推广到弯曲的黎曼空间。

1915 年，爱因斯坦连续发表了几篇有关广义相对论的论文。其中《用广义相对论解释水星近日点运动》第一次用广义相对论计算出了水星的剩余进动，并且声明：“在本文中我找到了这种最彻底和最完全的相对论的一个重要证明。”[①]同年发表了《引力的场方程》，提出了广义相对论引力场方程的完整形式。

1916 年，爱因斯坦发表了《广义相对论的基础》，对广义相对论的研究作了全面的总结。在论文中，爱因斯坦证明了牛顿理论可以作为相对论引力理论的第一级近似，并且给出了谱线红移，光线弯曲，行星轨道近日点进动的理论预言。

爱因斯坦解释为什么要扩充相对性公设，他写道：“物理学的定律必须具有这样的性质，它们对于以无论那种方式运动着的参照系都是成立的。沿着这条道路，我们就达到了相对论公设的扩充。”他又说：“普遍的自然规律是由那些对一切坐标系都有效的方程来表示的”，也就是说，它们对于无论那种代换（即坐标的变换）都是协变的（广义协变）。

广义相对论的结构体系可以用一张图来表示：



迄今为止，广义相对论的应用主要是在宇观领域，即宇宙学和天体物理学方面。从广义相对论出发建立起来的引力理论是目前最好的一种引力理论。在现有的几种与广义相对论竞争的理论中，广义相对论占有明显的优势，不过它是不是唯一可能的正确理论，尚未有定论。所以人们非常关心对广义相对论的实验检验，并且期望通过各种实验检验，进一步丰富和发展这一理论。

§6.5　广义相对论的实验检验

在广义相对论建立之初，爱因斯坦提出了三项实验检验，一是水星近日点的进动，二是光线在引力场中的弯曲，三是光谱线的引力红移。其中只有水星近日点进动是已经确认的事实，其余两项只是后来才陆续

① 爱因斯坦文集，第 2 卷，第 268 页。

得到证实。60 年代以后，又有人提出观测雷达回波延迟、引力波等方案。

6.5.1　水星近日点进动

1859 年，天文学家勒维利埃（Le Verrier）发现水星近日点进动的观测值，比根据牛顿定律计算的理论值每百年快 38 角秒。他猜想可能在水星以内还有一颗小行星，这颗小行星对水星的引力导致两者的偏差。可是经过多年的搜索，始终没有找到这颗小行星。1882 年，纽康姆（S.Newcomb）经过重新计算，得出水星近日点的多余进动值为每百年 43 角秒。他提出，有可能是水星因发出黄道光的弥漫物质使水星的运动受到阻尼。但这又不能解释为什么其他几颗行星也有类似的多余进动。纽康姆于是怀疑引力是否服从平方反比定律。后来还有人用电磁理论来解释水星近日点进动的反常现象，都未获成功。

1915 年，爱因斯坦根据广义相对论把行星的绕日运动看成是它在太阳引力场中的运动，由于太阳的质量造成周围空间发生弯曲，使行星每公转一周近日点进动为：

$$\varepsilon = 24\pi^2\alpha^2\ /T^2c^2(1-e^2)$$

其中 α 为行星的长半轴，c 为光速，以 ㎝/s 表示，e 为偏心率，T 为公转周期。对于水星，计算出 ε=43"/百年，正好与纽康姆的结果相符，一举解决了牛顿引力理论多年未解决的悬案。这个结果当时成了广义相对论最有力的一个证据。水星是最接近太阳的内行星。离中心天体越近，引力场越强，时空弯曲的曲率就越大。再加上水星运动轨道的偏心率较大，所以进动的修正值也比其他行星为大。后来测到的金星，地球和小行星伊卡鲁斯的多余进动跟理论计算也都基本相符。

6.5.2　光线在引力场中的弯曲

1911 年爱因斯坦在《引力对光传播的影响》一文中讨论了光线经过太阳附近时由于太阳引力的作用会产生弯曲。他推算出偏角为 0.83"，并且指出这一现象可以在日全食进行观测。1914 年德国天文学家弗劳德（E.F.Freundlich）领队去克里木半岛准备对当年八月间的日全食进行观测，正遇上第一次世界大战爆发，观测未能进行。幸亏这样，因为爱因斯坦当时只考虑到等价原理，计算结果小了一半。1916 年爱因斯坦根据完整的广义相对论对光线在引力场中的弯曲重新作了计算。他不仅考虑到太阳引力的作用，还考虑到太阳质量导致空间几何形变，光线的偏角为：a=1".75R_0/r，其中 R_0 为太阳半径，r 为光线到太阳中心的距离。

1919 年日全食期间，英国皇家学会和英国皇家天文学会派出了由爱丁顿（A.S.FEddington）等人率领的两支观测队分赴西非几内亚湾的普林西比岛（Principe）和巴西的索布腊儿尔（Sobral）两地观测。经过比较，两地的观测结果分别为 1".61±0".30 和 1".98±0".12。把当时测到的偏角数据跟爱因斯坦的理论预期比较，基本相符。这种观测精度太低，而且还会受到其他因素的干扰。人们一直在找日全食以外的可能。

20世纪60年代发展起来的射电天文学带来了希望。用射电望远镜发现了类星射电源。1974年和1975年对类星体观测的结果，理论和观测值的偏差不超过百分之一。

6.5.3 光谱线的引力红移

广义相对论指出，在强引力场中时钟要走得慢些，因此从巨大质量的星体表面发射到地球上的光线，会向光谱的红端移动。爱因斯坦1911年在《引力对光传播的影响》一文中就讨论了这个问题。他以Φ表示太阳表面与地球之间的引力势差，v_0、v分别表示光线在太阳表面和到达地球时的频率，得：

$$(v_0 - v)/v = -\Phi/c^2 = 2\times10^{-6}\text{.}$$

爱因斯坦指出，这一结果与法布里（C.Fabry）等人的观测相符，而法布里当时原来还以为是其它原因的影响。

1925年，美国威尔逊山天文台的亚当斯（W.S.Adams）观测了天狼星的伴星天狼A。这颗伴星是所谓的白矮星，其密度比铂大二千倍。观测它发出的谱线，得到的频移与广义相对论的预期基本相符。

1958年，穆斯堡尔效应得到发现。用这个效应可以测到分辨率极高的γ射线共振吸收。1959年，庞德（R.V.Pound）和雷布卡（G.Rebka）首先提出了运用穆斯堡尔效应检测引力频移的方案。接着，他们成功地进行了实验，得到的结果与理论值相差约百分之五。

用原子钟测引力频移也能得到很好的结果。1971年，海菲勒（J.C.Hafele）和凯丁（R.E.Keating）用几台铯原子钟比较不同高度的计时率，其中有一台置于地面作为参考钟，另外几台由民航机携带登空，在1万米高空沿赤道环绕地球飞行。实验结果与理论预期值在10%内相符。1980年魏索特（R.F.C.Vessot）等人用氢原子钟做实验。他们把氢原子钟用火箭发射至一万公里太空，得到的结果与理论值相差只有±7×10^{-5}。

6.5.4 雷达回波延迟

光线经过大质量物体附近的弯曲现象可以看成是一种折射，相当于光速减慢，因此从空间某一点发出的信号，如果途经太阳附近，到达地球的时间将有所延迟。1964年，夏皮罗（I.I.Shapiro）首先提出这个建议。他的小组先后对水星、金星与火星进行了雷达实验，证明雷达回波确有延迟现象。近年来开始有人用人造天体作为反射靶，实验精度有所改善。这类实验所得结果与广义相对论理论值比较，相差大约1%。用天文学观测检验广义相对论的事例还有许多。例如：引力波的观测和双星观测，有关宇宙膨胀的哈勃定律，黑洞的发现，中子星的发现，微波背景辐射的发现等等。通过各种实验检验，广义相对论越来越令人信服。然而，有一点应该特别强调：我们可以用一个实验否定某个理论，却不能用有限数量的实验最终证明一个理论；一个精确度并不很高的实验也

许就可以推翻某个理论，却无法用精确度很高的一系列实验最终肯定一个理论。对于广义相对论的是否正确，人们必须采取非常谨慎的态度，严格而小心地作出合理的结论。

第七章　早期量子论

§7.1　历史概述

19 世纪末一系列重大发现，揭开了近代物理学的序幕。1900 年普朗克为了克服经典理论解释黑体辐射规律的困难，引入了能量子概念，为量子理论奠下了基石。随后，爱因斯坦针对光电效应实验与经典理论的矛盾，提出了光量子假说，并在固体比热问题上成功地运用了能量子概念，为量子理论的发展打开了局面。1913 年，玻尔在卢瑟福有核模型的基础上运用量子化概念，对氢光谱作出了满意的解释，使量子论取得了初步胜利。从 1900 年到 1913 年，可以称为量子论的早期。

以后，玻尔、索末菲和其他许多物理学家为发展量子理论花了很大力气，却遇到了严重困难。要从根本上解决问题，只有待于新的思想，那就是“ 波粒二象性 ”。光的波粒二象性早在 1905 年和 1916 年就已由爱因斯坦提出，并于 1916 年和 1923 年先后得到密立根光电效应实验和康普顿 X 射线散射实验证实，而物质粒子的波粒二象性却是晚至 1923 年才由德布罗意提出。这以后经过海森伯（W.K.Heisenberg，1901—1976），薛定谔（E.SchrÖdinger，1887—1961）、玻恩（Max Born，1882—1970）和狄拉克等人的开创性工作,终于在 1925 年—1928 年形成完整的量子力学理论，与爱因斯坦相对论并肩形成现代物理学的两大理论支柱。

量子力学是描述微观世界的基本理论。它能很好地解释原子结构、原子光谱的规律性、化学元素的性质，光的吸收与辐射等等方面。1928 年狄拉克将相对论运用于量子力学，又经海森伯、泡利等人的发展，形成了量子电动力学。量子电动力学研究的是电磁场与带电粒子的相互作用。1947 年，从实验发现了兰姆移位，在此基础上，1948—49 年费因曼（R.P.Feynman，1918—1988）、施温格（J.Schwinger）和朝永振一郎用重正化概念发展了量子电动力学。它从简单明确的基本假设出发，所得结果与实验高度精确地相符。

我们将按四个方面分四章叙述量子理论的发展。本章介绍量子论的提出，第八章介绍玻尔原子理论的渊源和发展，第九章介绍波粒二象性的提出，第十章介绍量子力学的建立和发展。

§7.2　普朗克的能量子假设

§5.4 中讲到普朗克在黑体辐射的维恩公式和瑞利公式之间寻求协调统一，找到了与实验结果符合极好的内插公式，迫使他致力于从理论上推导这一新定律。

关于这个过程，普朗克后来回忆道[①]：

“即使这个新的辐射公式证明是绝对精确的，如果仅仅是一个侥幸揣测出来的内插公式，它的价值也只能是有限的。因此，从 10 月 19 日提出这个公式开始，我就致力于找出这个公式的真正物理意义。这个问题使我直接去考虑熵和几率之间的关系，也就是说，把我引到了玻尔兹曼的思想。”

这里指的熵和几率的关系就是玻尔兹曼对热力学第二定律所作的统计解释。普朗克不同意统计观点，曾经跟玻尔兹曼有过论战。他认为，几率定律每一条都有例外，而热力学第二定律则普遍有效，所以他不相信这一统计解释。

但是，普朗克从热力学的普遍理论，经过几个月的紧张努力，没有能直接推出新的辐射定律。最后，只好“孤注一掷”用玻尔兹曼的统计方法来试一试。

玻尔兹曼的方法首先要求把能量分成一份一份，分给有限个数的谐振子，就象分配给单个的分子原子那样。设能量 E 划分为 P 个相等的小份额 ε（能量元），即

$$E=P\varepsilon$$

这些能量元 ε 在 N 个谐振子中可以按不同的比例分给单个谐振子。假设有 W 种分配方案（也叫配容数），根据排列组合法则，可得：

$$W=\frac{(N+P-1)!}{(N-1)!\,P!}$$

由于 N、P 均≫1，利用斯特林（Stirling）公式，lnx！=xlnx-x，得：

$$W=(N+P)^{N+P}/N^N P^P \qquad (7-1)$$

配容数 W 就是几率。玻尔兹曼早在 1877 年就由分子运动论认识到熵 S 与几率的对数成正比，（参看§2.8）。将（7-1）式取对数，得：

$$\ln W=N+P\ln(N+P)-N\ln N-P\ln P.$$

因为 N 个谐振子系统的熵 S_N 是单个谐振子的熵的 N 倍，即 $S_N=NS$，单个谐振子的平均能量

$$U=\frac{E}{N}=\frac{P\varepsilon}{N}\text{，而}S_N=k\ln W\text{，}$$

其中 k 称为玻尔兹曼常数，得：

$$S=k\left[\left(1+\frac{U}{\varepsilon}\right)\ln\left(1+\frac{U}{\varepsilon}\right)-\frac{U}{\varepsilon}\ln\frac{U}{\varepsilon}\right] \qquad (7-2)$$

从热力学公式 $\frac{1}{T}=\frac{dS}{dU}$ 可求出：

$$\frac{1}{T}=\frac{k}{\varepsilon}\left[\ln\left(1+\frac{U}{\varepsilon}\right)-\ln\frac{U}{\varepsilon}\right]$$

[①] 赫尔曼著，周昌忠译，量子论初期史，商务印书馆，1980，p.19.

于是得：

$$U=\frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT}-1} \quad (7-3)$$

另一方面，与辐射公式等效的熵应为频率v的函数，即$S=f\left(\frac{U}{v}\right)$，

于是普朗克写道[①]：

“如果将维恩定律的这一公式和关于S的方程（7-2）一起考虑，就会发现能量元ε一定和频率成正比，即：

ε=hv

因此有：

$$S=k\left[\left(1+\frac{U}{hv}\right)\ln\left(1+\frac{U}{hv}\right)-\frac{U}{hv}\ln\frac{U}{hv}\right]$$

这里h和k是普适常数”。

于是，公式（7—3）就可改写为：

$$U=\frac{hv}{e^{hv/kT}-1}$$

或能量密度$u=\frac{8\pi hv^3}{c^3}\frac{1}{e^{hv/kT}-1}$

普朗克还根据黑体辐射的测量数据，计算出普适常数h值：h=6.65×10^{-27}尔格·秒=6.65×10^{-34}焦·秒

后来人们称这个常数为普朗克常数，（它就是普朗克所谓的“作用量子”，）而把能量元称为能量子。

普朗克提出能量子假说有划时代的意义。但是，不论是普朗克本人还是他的同时代人当时对这一点都没有充分认识。在 20世纪的最初5年内，普朗克的工作几乎无人问津，普朗克自己也感到不安，总想回到经典理论的体系之中，企图用连续性代替不连续性。为此，他花了许多年的精力，但最后还是证明这种企图是徒劳的。

§7.3　光电效应的研究

爱因斯坦最早明确地认识到，普朗克的发现标志了物理学的新纪元。1905年，爱因斯坦在著名论文：《关于光的产生和转化的一个试探性观点》中[①]，发展了普朗克的量子假说，提出了光量子概念，并应用到光的发射和转化上，很好地解释了光电效应等现象。后来，爱因斯坦称这篇论文是非常革命的，因为它为研究辐射问题提出了崭新的观点。

[①] M.Planck,Ann.d.Phys.309(1901)p.553.

[①] A.Einstein,Ann.d.Phys.(4)17(1905)p.132,译文见：许良英等编译，爱因斯坦文集，第二卷，商务印书馆，1977p.37.

7.3.1 爱因斯坦的光量子理论

爱因斯坦在那篇论文中，总结了光学发展中微粒说和波动说长期争论的历史，揭示了经典理论的困境，提出只要把光的能量看成不是连续分布，而是一份一份地集中在一起，就可以作出合理的解释。他写道：

“在我看来，如果假定光的能量在空间的分布是不连续的，就可以更好地理解黑体辐射、光致发光、紫外线产生阴极射线（按：即光电效应），以及其他有关光的产生和转化的现象的各种观测结果。根据这一假设，从点光源发射出来的光束的能量在传播中将不是连续分布在越来越大的空间之中，而是由一个数目有限的局限于空间各点的能量子所组成。这些能量子在运动中不再分散，只能整个地被吸收或产生。”

也就是说，光不仅在发射中，而且在传播过程中以及在与物质的相互作用中，都可以看成能量子。爱因斯坦称之为光量子，也就是后来所谓的光子（photon）。光子一词则是 1926 年由路易斯（G.N. Lewis）提出的。

作为一个事例，爱因斯坦提到了光电效应。他解释说[①]：

“能量子钻进物体的表面层，……，把它的全部能量给予了单个电子……，一个在物体内部具有动能的电子当它到达物体表面时已经失去了它的一部分动能。此外还必须假设，每个电子在离开物体时还必须为它脱离物体做一定量的功 P（这是物体的特性值——按：即逸出功）。那些在表面上朝着垂直方向被激发的电子，将以最大的法线速度离开物体。”

这样一些电子离开物体时的动能应为：

$$h\nu-P$$

爱因斯坦根据能量转化与守恒原理提出，如果该物体充电至正电位 V，并被零电位所包围（V 也叫遏止电压），又如果 V 正好大到足以阻止物体损失电荷，就必有：

$$eV=h\nu-P,$$

其中 e 即电子电荷。此即众所周知的爱因斯坦光电方程。

爱因斯坦的光量子理论和光电方程，简洁明了，很有说服力，但是当时却遭到了冷遇。人们认为这种把光看成粒子的思想与麦克斯韦电磁场理论抵触，是奇谈怪论。甚至量子假说的创始人普朗克也表示反对。1913 年普朗克等人在提名爱因斯坦为普鲁士科学院会员时，一方面高度评价爱因斯坦的成就，同时又指出：“有时，他可能在他的思索中失去了目标，如他的光量子假设。”爱因斯坦提出光量子假设和光电方程，

[①] A.Einstein,Ann.d.phys.(4)17(1905)p.132,译文见：许良英等编译，爱因斯坦文集，第二卷，商务印书馆，1977p.37.

[②] 转引自 A.Pais,SubtleistheLord…Oxford,1982p.382.

的确是很大胆的，因为当时还没有足够的实验事实来支持他的理论，尽管理论与已有的实验事实并无矛盾。爱因斯坦非常谨慎，所以称之为试探性观点（heuristischen Gesichtspunkt）。如果我们比较详细地回顾光电效应的发现史，就会更加佩服爱因斯坦的胆略。

7.3.2 光电效应的早期研究

1．光电效应的发现

说来有趣。如果说光电效应是光的粒子性的实验证据，发现这一效应却是赫兹（Heinrich Hertz）在研究电磁场的波动性时偶然作出的。这件事发生在 1887 年，当时赫兹正用两套放电电极做实验，一套产生振荡，发出电磁波；另一套充当接收器。为了便于观察，赫兹偶然把接收器用暗箱罩上，结果发现接受电极间的火花变短了。赫兹工作非常认真，用各种材料放在两套电极之间，证明这种作用既非电磁的屏蔽作用，也不是可见光的照射，而是紫外线的作用。当紫外线照在负电极上时，效果最为明显，说明负电极更易于放电。

2．揭示光电效应的机制

赫兹的论文《紫外线对放电的影响》[①]发表后，引起了广泛反响。1888 年，德国物理学家霍尔瓦克斯（Wilhelm Hallwachs），意大利的里奇（Augusto Righi）和俄国的斯托列托夫（А．Г．СтоЛетов）几乎同时作了新的研究。图 7-l 是斯托列托夫的实验装置原理图。在金属极板 C 前几毫米远处，安放一金属网，极板 C 与金属网分别接于电池 B 的两端，使 C 带负电。用检流计 G 测量电流，弧光从 A 照向极板 C，检流计指示有电流，将电池极性对换，使 C 极电位为正，则检流计不指示电流。显然，这个实验表明负电极在光照射下（特别是紫外线照射下），会放出带负电的粒子，形成电流。1889 年，爱耳斯特（J.Elster）和盖特尔（H.F.Geitel）进一步指出，有些金属（如钾、钠、锌、铝等）不但对强弧光有光电效应，对普通太阳光也有同样效应，而另一些金属（如锡、铜、铁)则没有。对于锌板，要加+2.5 伏电压，才能在光照之下保持绝缘。

■图 7-1 斯托列托夫的实验原理图

1899 年，J.J.汤姆生用了一个巧妙的方法测光电流的荷质比。他用锌板作光阴极，阳极与之平行，相距约 1 厘米。紫外光照射在锌板上，从锌板发射出来的光电粒子经电场加速，向正极运动。整个装置处于磁场 H 之中，如图 7-2。在磁场的作用下，光电粒子作圆弧运动。只要磁场足够强，总可以使这些粒子返回阴极，于是极间电流乃降至零。J.J.汤姆生根据电压、磁场和极间距离，计算得光电粒子的荷质比 e/m 与阴极射线的荷质比相近，都是 10^{11} 库仑/千克的数量级。这就肯定光电流和阴

---

① H.Hertz,ElectricWaves,MacMillan,1900p.63.

极射线实质相同，都是高速运动的电子流。这才搞清楚，原来光电效应就是由于光、特别是紫外光，照射到金属表面使金属内部的自由电子获得更大的动能，因而从金属表面逃逸到空间的一种现象。不过，这只是一种定性解释。要根据经典电磁理论建立定量的光电效应理论，却遇到了难以克服的困难。特别是 1900 年勒纳德的新发现使物理学家感到十分迷惑。

■图 7-2J.J.汤姆生测光电流的荷质比

7.3.3　勒纳德的新发现

勒纳德为了研究光电子从金属表面逸出时所具有的能量，在电极间加反向电压，直到使光电流截止，从反向电压的截止值（即遏止电压）V，可以推算电子逸出金属表面的最大速度。图 7-3 是勒纳德研究光电效应的实验装置。入射光照在铝阴极 A 上，反向电压加在阳极 E 与 A 之间。阳极中间挖了一个小孔，让电子束穿过，打到集电极 D 上。图 7-4 是集电极收集到的光电流随电压改变的曲线。

■图 7-3 勒纳德研究光电效应的实验装置

勒纳德用不同材料做阴极，用不同光源照射，发现都对遏止电压有影响，唯独改变光的强度对遏止电压没有影响。

电子逸出金属表面的最大速度与光强无关，这就是勒纳德的新发现。

但是这个结论与经典理论是矛盾的。根据经典理论，电子接受光的能量获得动能，应该是光越强，能量也越大，电子的速度也就越快。

■图 7-4 勒纳德光电流曲线

和经典理论有抵触的实验事实还不止此，在勒纳德之前，人们已经遇到了其他的矛盾，例如：

1．光的频率低于某一临界值时，不论光有多强，也不会产生光电流，可是根据经典理论，应该没有频率限制。

2．光照到金属表面，光电流立即就会产生，可是根据经典理论，能量总要有一个积累过程。

本来，这些矛盾正是揭露了经典理论的不足，可是，勒纳德却煞费苦心地想出了一个补救办法，企图在不违反经典理论的前提下，对上述事实作出解释。他在 1902 年提出触发假说，假设在电子的发射过程中，光只起触发作用，电子原本就是以某一速度在原子内部运动，光照到原子上，只要光的频率与电子本身的振动频率一致，就发生共振，所以光只起打开闸门的作用，闸门一旦打开，电子就以其自身的速度从原子内部逸走。他认为，原子里电子的振动频率是特定的，只有频率合适的光才能起触发作用。他还建议，由此也许可以了解原子内部的结构。

勒纳德的触发假说很容易被人们接受，当时颇有影响。1905 年，还没有当上专利局二级技术员的爱因斯坦提出了光量子理论和光电方程。

就在这一年，勒纳德因阴极射线的研究获得了诺贝尔物理奖。难怪人们没有对爱因斯坦的光电效应理论给予应有的重视。

7.3.4 密立根的光电效应实验

当然，爱因斯坦的光量子理论没有及时地得到人们的理解和支持，并不完全是由于勒纳德的触发假说占了压倒优势，因为不久这一假说被勒纳德自己的实验驳倒。爱因斯坦遭到冷遇的根本原因在于传统观念束缚了人们的思想，而他提出遏止电压与频率成正比的线性关系，并没有直接的实验依据。因为测量不同频率下纯粹由光辐射引起的微弱电流是一件十分困难的事。

直到 1916 年，才由美国物理学家密立根（Robert Millikan，1868—1953）作出了全面的验证。他的实验非常出色，主要是排除了表面的接触电位差、氧化膜的影响，获得了比较好的单色光。他在自己的论文中写道[①]：

“实验样品固定在小轮上，小轮可以用电磁铁控制，所有操作都是借助于装在（真空管）外面的可动电磁铁来完成。随着操作的需要，真空管的结构越来越复杂，到后来可以说它简直成了一个真空的机械车间。所有的真空管都要进行这样几步操作：

（l）在真空中排除全部表面的全部氧化膜；

（2）测量消除了氧化膜的表面上的光电流和光电位；

（3）同时测量表面的接触电位差。”

图 7-5 是密立根自称为“真空机械车间”的实验装置图，主要的部件就是一支结构复杂的真空管。他选了三种逸出功较低的材料——Na、K、Li（均为碱金属）作为光阴极，做成圆柱形，装在小轮 W 上，用电磁铁操纵转动方位。剃刀 K 用另一电磁铁控制，一边旋转，一边对圆柱形电极表面进行切削，刮掉电极上极薄的一层表皮，让新刮出的新鲜表面处于真空中保持清洁。然后将光阴极转至对准电极 S 的位置，以测量其接触电位差；再转一个角度，对准窗口 O，接受光的照射，同时测其光电流。

■图 7-5 密立根光电效应实验装置图

图 7-6 和图 7-7 是密立根 1916 年发表的两张实验曲线。图 7-6 给出 6 种频率的单色光（对应于汞的 6 根谱线）照射下的光电流曲线，由此所得的遏止电压值与对应的频率作成图 7-7，这是一根很好的直线。从直线的斜率求出的普朗克常数 $h=6.56\times10^{-34}$ 焦耳·秒，与普朗克 1900 年从黑体辐射求得的结果符合甚好。爱因斯坦对密立根光电效应实验作了高度评价，指出[①]：“我感激密立根关于光电效应的研究，它第一次判决

[①] R.A.Millikan,Phys.Rev.7(1916)p.355.

[①] A.Einstern,Science,73(1931)p.378

性地证明了在光的影响下电子从固体发射与光的振动周期有关，这一量子论的结果是辐射的粒子结构所特有的性质。”

■图 7-6 密立根发表的光电流曲线之一（曲线与横坐标的交点即为遏止电压）

■图 7-7 钠的遏止电压与频率成正比（从斜率可算出 h 值）

正是由于密立根全面地证实了爱因斯坦的光电方程，光量子理论才开始得到人们的承认。1921 年和 1923 年，他们两人分别获得了诺贝尔物理奖。

密立根的光电实验是从 1904 年开始的，到 1914 年发表初步成果，历经十年，在 1923 年的领奖演说中，密立根公开承认自己曾长期抱怀疑态度，他说道[①]：

“经过十年之久的试验、改进和学习，有时甚至还遇到挫折，在这之后，我把一切努力从一开头就针对光电子发射能量的精密测量，测量它随温度、波长、材料（接触电动势）改变的函数关系。与我自己预料的相反，这项工作终于在 1914 年成了爱因斯坦方程在很小的实验误差范围内精确有效的第一次直接实验证据，并且第一次直接从光电效应测定普朗克常数 h。”

密立根并不讳言，他在做光电效应实验时，本来的目的是希望证明经典理论的正确性，甚至在他宣布证实了光电方程时，他还声称要肯定爱因斯坦的光量子理论还为时过早。

密立根对量子理论的保守态度有一定的代表性，说明量子理论在发展过程中遇到的阻力是何等的巨大！

§7.4　固体比热

在量子论初期史中，固体比热的研究是继黑体辐射和光电效应之后的又一重大课题。1907 年爱因斯坦进一步把能量子假说用于固体比热，克服了经典理论的又一困难，并及时得到了能斯特（Walther Nernst，1864—1941）的实验验证和大力宣传，使量子论开始被人们认识，从而打开了进一步发展的局面。

7.4.1　固体比热的历史

比热是化学家和物理学家共同关心的问题。1819 年，原是化学家的杜隆（P.L.Dulong，1785—1838）和物理学家珀替（A.T.Petit,1790—1820）在长期合作研究物质的物理性质与原子特性的关系之后，进行了一系列比热实验。他们选择的对象是各种固体，想通过比热研究其物理性质。在大量数据的基础上他们发现，对于许多物质原子量和比热的乘

[①] R.A.Milllikan，"NobelLecture"inNobelLectures：Physics,1922—1941,Elsevi- er,1965p.61

积往往是同一常数。由此总结出一条定律：“所有简单物体的原子都精确地具有相同的热容量。”

这个经验定律在分子运动论中得到解释。根据麦克斯韦-玻尔兹曼能量均分原理，如果每个原子都看成是谐振子，则定容原子热[①]（注）应为

$$C_v = 6 \times N \times \frac{1}{2}k = 3R \approx 6\text{卡/克原子·度}$$

与杜隆-珀替的实验数据基本相符。

1864 年，化学家柯普（H.F.M.Kopp）将这一定律推广到化合物，解释了 1832 年纽曼（F.E.Neumann）的分子热定律。这个定律是说：化学式为 A_a、B_b、C_c 的化合物，其分子热容量等于

$$C = aC_A + bC_B + cC_C + \cdots$$

其中 C_A、C_B、C_C……分别为不同元素 A、B、C…的原子热。

这两个定律在实际上有重要的应用价值，因为根据杜隆-珀替定律可以从比热推算未知物质的原子量，而根据纽曼-柯普定律可以推算化合物的分子热。

然而，实验并不都与杜隆-珀替定律相符。人们早就知道较轻的某些固体：例如铍、硼、碳、硅，其原子热（摩尔热容）小于 3R，特别是金钢石，在常温下只有 1.8 卡/克原子·度。

1872 年，H.F.韦伯（HeinrichFriedrichWeber，1843—1912）经过仔细实验，发现在高温（约 1300°C）时，金刚石的 C_V 值竟达到 6 卡/克原子·度。这正是杜隆-珀替定律的标准结果，说明那些例外情况与物质的熔点高有关。以此类推，室温下原子热接近正常值的物质应在低温下偏离杜隆-珀替定律，这就引起了人们研究物质比热随温度变化的兴趣。随即，H．F．韦伯的发现为许多实验家在低温下测量不同物质的比热实验所证实。1898 年贝恩（Behn），1905 年杜瓦[①]均有文章论述。温度越低，比热越小，已成为众所周知的事实。

H．F．韦伯是苏黎世联邦工业大学的物理教授，他的工作成果自然会受到他的学生重视，而爱因斯坦早年就学于苏黎世时，正好听过他的讲课，并在他的实验室中工作过。

7.4.2　爱因斯坦对固体比热的研究

1906 年，爱因斯坦应用普朗克的量子假说于固体比热[②]，他假设固体中所有原子都是以同一频率 ν 振动，每个原子有三个自由度，N 个原子的平均能量为：

[①] （注）原子热即摩尔热容。

[①] J.Dewar,Proc.Roy.Soc.London,(A)76(1905)p.330

[②] A.Einstein,Ann.d.Phys.(4)22(1907)180.中译文见：许良英等编译，爱因斯坦文集，第二卷，商务印书馆，1979，p.137.

$$E = 3N\frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right)-1}$$

其中 N 为阿佛伽德罗常数，T 为绝对温度，由此得定容原子热为

$$C_v = \frac{d\bar{E}}{dT} = 3R\frac{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right)}{\left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right)-1\right]^2}$$

或如爱因斯坦那样，取 $\beta \equiv \frac{h}{k}$，得

$$C_v = 5.94\frac{(\beta\nu)^2\exp\left(\frac{\beta\nu}{T}\right)}{\left[\exp\left(\frac{\beta\nu}{T}\right)-1\right]^2}$$

他引用 H.F.韦伯的测量数据，与理论曲线比较，（如图 7-8），理论和实验基本相符。

■图 7-8 金钢石的原子热曲线

爱因斯坦写道：“可以期望，……在足够低的温度下，一切固体的比热将随温度的下降而显著下降。”

爱因斯坦第一次用量子理论解释了固体比热的温度特性并且得到定量结果。然而，这一次跟光电效应一样，也未引起物理学界的注意。不过，比热问题很快就得到了能斯特的低温实验所证实，比光电效应要有利得多。有趣的是，能斯特从事低温下固体比热的测量，原来并不是为了检验爱因斯坦的比热理论，而是从自己的目的出发，为了检验他自己的热学新理论（参看§2.6）。实验的结果不仅证实了能斯特的理论，也给爱因斯坦提供了直接的证据。

7.4.3 能斯特的工作

能斯特的低温比热实验有相当难度。他要求把比热的测量做到液氢温度（氢的沸点为-252.9℃，即 20.3K），可是氢的液化还刚由杜瓦实现不久，技术上存在很多问题。以前测低温下的比热，都是取很大一段温度间隔，得到的是比热的平均值，不能反映真实情况。为此，能斯特和他的学生作了重大改进。他们创制了真空量热计，温度间隔只需取 1—2 度。这是一项十分细致的工作，因为待测的量极其微小。实验历时 3—4 年，直到 1910 年 2 月，才发表实验结果。在论文中宣称所得结果与爱因斯坦的理论定性相符。

为了探讨比热的理论，能斯特亲自到苏黎世访问爱因斯坦。他本来并不相信量子理论，是他的学生林德曼（F.Lindemann）促使他接近量子理论。1910 年，林德曼发展了爱因斯坦的比热理论，并根据物质的熔点温度、分子量和密度计算原子振动频率，结果与实验所得光学吸收频率

相符，使能斯特对爱因斯坦的工作产生了信心。当液氢温度下获得的新数据说明爱因斯坦的理论确实是解决比热问题的唯一途径时，能斯特写道[①]：

“我相信没有任何一个人，经过长期实践对理论获得了相当可靠的实验验证之后（这可不是一件轻而易举的事），当他再来解释这些结果时，会不被量子理论强大的逻辑力量所说服，因为这个理论一下子澄清了所有的基本特征。”

能斯特不只是宣布自己是量子理论的支持者，而且还促使这个理论进一步得到发展。他发现，当温度降到接近绝对零度时，比热并不是象爱因斯坦公式表示的那样按指数下降，而是下降得更慢一些。1911 年，能斯特与林德曼根据爱因斯坦的方程提出一经验公式：

$$C_v = \frac{3R}{2}\left\{\frac{\left(\frac{\beta v}{T}\right)^2 \exp\left(\frac{\beta v}{T}\right)}{\left[\exp\left(\frac{\beta v}{T}\right)-1\right]^2} + \frac{\left(\frac{\beta v}{2T}\right)^2 \exp\left(\frac{\beta v}{2T}\right)}{\left[\exp\left(\frac{\beta v}{2T}\right)-1\right]^2}\right\}$$

这是对爱因斯坦理论的重要补充。爱因斯坦旋即承认这是一个有价值的公式。其实，他早就申明过，用单一频率是为了简化，不可避免某些地方会造成理论和实验结果的分歧。

7.4.4 第一届索尔威会议

量子理论应用于比热问题获得成功，引起了人们的注意，有些物理学家相继投入这方面的研究。在这样的形势下，能斯特积极活动，得到比利时化学工业巨头索尔威（Ernest Solvay）的资助，促使有历史意义的第一届索尔威国际物理会议于 1911 年 10 月 29 日在比利时的布鲁塞尔召开，讨论的主题就是《辐射理论和量子》[①]在这次会议上，能斯特和爱因斯坦对比热问题都作了发言。他们的看法虽有不同，但在对待量子理论的态度上没有重大分歧。

索尔威会议在宣传量子理论上起了很好的作用。与会者多是第一流的科学家，他们把会议的内容带回各自的国家，影响到更多的同行。例如：卢瑟福回到英国，曾与玻尔详细讨论过索尔威会议的内容，法国的路易斯·德布罗意从他兄长莫里斯·德布罗意编辑的索尔威会议文集中获得了会议的信息，引起了极大的兴趣。他们两人后来都对量子理论的发展作了卓越的贡献。索尔威会议以后每隔 3—4 年召开一次，每一次都及时地讨论了重大的科学前沿问题，对物理学的发展起了推动作用。

[①] M.J.Klein,Science,148(1965)p.176.

[①] J.Mehra,TheSolvayConferenceonPhysics,Reidel,1975

第八章　玻尔原子理论的渊源和发展

§8.1　原子模型的历史演变

电子的发现，证明原子内含有确定数目的电子，而光谱的发射似乎与电子的行为有密切关系。这个问题的澄清有极为重要的意义。在这以前，人们对原子的内部状态一无所知，只能把原子看成是一个不可分的整体，顶多假设它是一个谐振子在作机械运动或是一个赫兹振子在作电磁振荡。从这些假设出发，虽然也可进行数学计算，但对物质结构的了解，却无济于事。而在发现电子、确证原子可分之后，才有可能真正建立原子结构的模型。探索原子结构的理论，从而对光谱的发射和其他原子现象作出正确的解释。

所谓原子结构模型（以下我们简称为原子模型），实际上也就是针对下列问题给出答案：

原子内部有带负电的电子，但原子是中性的，所以必定还有带正电的部分，这些正电荷具有什么性质？是怎样分布的？正、负电荷之间如何相互作用？原子内究竟有多少电子？电子的数目如何决定？怎样才能保持原子的稳定状态？怎样解释元素的周期性？怎样解释线光谱？怎样解释放射性？等等。

面对这些问题，物理学家们根据自己的实践和见解从不同的角度提出各种不同的模型。经过实践的检验，有的成功，有的失败。下面选取一些有代表性的例子来说明原子模型的历史演变。

8.1.1　长岗的土星模型

长岗半太郎（1865—1950）是日本东京大学教授，1903 年根据麦克斯韦的土星卫环理论推测原子的结构，他的论文题目是：《用粒子系统的运动学阐明线光谱、带光谱和放射性》，发表于 1904 年《哲学杂志》，在论文中，长岗写道：

“我要讨论的系统，是由很多质量相同的质点，联接成圆，间隔角度相等，互相间以与距离成平方反比的力相互排斥。在圆中心有一大质量的质点对其它质点以同样定律的力吸引。如果这些互相排斥的质点以几乎相同的速度绕吸引中心旋转，只要吸引力足够大，即使有小的干扰，这系统一般将保持稳定。”

然后，长岗仿照麦克斯韦的理论进行计算，说明电子运动和光谱的关系。

虽然长岗的理论很不完善，但他实际上已经提出了原子核的观念，为后来卢瑟福的有核原子模型开辟了道路。

其实，核的观念并不是长岗首先提出来的，在他之前，斯坦尼讨论

过这种可能性，1901 年佩兰（Perrin）在论文中也曾假设过类似的模型，即原子有正核，外面围绕着负电子，电子沿轨道运行的频率是辐射的光波频率。还有，洛奇也曾指出，麦克斯韦的土星系也许适用于电子系统。可见，原子的有核模型由来已久，只是未获充分证据而已。然而，它的致命弱点是无法满足经典理论提出的稳定性要求，所以长岗的论文发表不久，就有人写文驳斥。

8.1.2 勒纳德的中性微粒模型

1920 年勒纳德已经接受了阴极射线是电子束的结论。这时他对赫兹和他自己发现的阴极射线穿透金属箔的现象作出新的解释。他认为这件事说明金属中的原子并非实心的弹性球，其中必有大量的空隙。他假设原子内的电子和相应的正电荷组成中性微粒，取名为“动力子”（dynamids），无数动力子浮游在原子内部的空间。

他的模型未获实验证实，因此影响不大。

8.1.3 里兹的磁原子模型

1908 年里兹提出原子光谱的组合原理，同时也指出：从已知光谱规律来看，这些规律仅仅涉及频率 v，而不涉及 v^2，可见电子所受作用力不是与其位移成正比，而是与其速度成正比。根据电磁理论，这种情况正好与电荷在电磁场中运动的情况相当。由此他提出一个假说，光谱线的频率决定于磁场作用力。

里兹进一步假设磁场是由分子磁棒产生的，磁分子的磁极强度为 μ，磁极距离为 l，电荷 e 处于沿磁棒轴线上距最近的磁极为 r 的某一点上，该点磁场为：

$$H = \mu\left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+l)^2}\right]$$

在磁场作用下，电荷 e 将在与磁场垂直的平面内作螺旋运动，频率为 $\frac{eH}{2\pi mc}$（内c为光速）。

$$\therefore v = \frac{eH}{2\pi mc} = \frac{\mu e}{2\pi mc}\left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+l)^2}\right]$$

这个方程与氢光谱的巴耳末公式：

$$v = R\left[\frac{1}{a^2} - \frac{1}{(a+n)^2}\right]$$完全对称。

里兹根据电磁理论，进一步推测分子磁棒是由圆柱形的电子沿轴旋转。（有趣的是，他比乌伦贝克和高斯密特的自旋电子概念还早 17 年！）里兹还推导出光谱的一些性质，与实验结果很符合。

8.1.4 汤姆生的实心带电球模型

J.J.汤姆生的原子模型在 1910 年之前是影响最大的一种。他根据 1902 年开尔文提出的实心带电球的想法，对原子结构进行了长期的研究，于 1904 年发表论文，题为：《论原子的构造：关于沿一圆周等距分

布的一些粒子的稳定性和振荡周期的研究》。[1]在这篇论文里，他运用经典力学理论，根据电荷之间的平方反比作用力，进行了大量计算，求证电子稳定分布所应处的状态。他假设原子带正电的部分象“流体”一样均匀分布在球形的原子体积内，而负电子则嵌在球体的某些固定位置。电子一方面要受正电荷的吸引，一方面又要自相排斥，因此，必然有一种状态可使电子平衡。他证明这些电子必然组成球，然而六个以上的电子不能稳定在一个环上，数目更多就要组成二个以上的环。汤姆生还借助磁棒吸引水面上漂浮的磁针（1878 年 A.梅尼作过的实验），用模拟实验方法证明自己理论的正确性。

■图 8-1 梅尼磁针实验

在汤姆生的原子模型中最重要的是原子内的电子数 n。开始他根据电子荷质比实验，得知电子质量$m_e \approx \frac{1}{1836} m_H$（其中$m_H$为氢原子质量），再假设正负电荷具有对称的性质，估计原子中的电子数 n 约为原子量 A 的一千倍，即 n=1000A。这个数究竟符不符合实际，唯一的检验标准就是实验。为此，汤姆生设计了 X 射线和β射线的散射实验，希望通过射线和原子中电子的相互作用，探明原子内部电子的数目。

然而，从巴克拉（Barkla）的 X 散射实验，得到的结果是 n≈2A；而从β散射实验，得到 n≈0.2A。据此汤姆生判定 n 与 A 同数量级。1910 年，克劳瑟根据汤姆生的β散射理论，推证得出 n=3A，而卢瑟福从α散射实验得到$n \approx \frac{1}{2} A$。

■图 8-2 梅尼磁针的分布图

这是汤姆生和他的学生对原子理论作出的一项重大贡献。这些工作的意义不仅在于打破了原子中正负电荷互相对称的观念，而且由此导致了α大角度散射实验——证实了原子核的存在。

汤姆生模型的根本困难在于：一方面要满足经典理论对稳定性的要求，一方面要能解释实验事实，而这两方面往往是矛盾的。所以尽管汤姆生千方百计地改善自己的理论，仍无补于事，终于被卢瑟福的有核模型代替。

8.1.5 哈斯将量子假说运用于原子模型的尝试

哈斯（A.E.Haas，1884—1941）是奥地利的一位年青物理学家，他在研究黑体辐射时很早就注意到了量子论。他读过 J.J.汤姆生专门讨论原子结构的书《电与物质》和维恩的文章。维恩在文章中提到：能量元也许“可以从原子性质中推导出来。”这些论著促使哈斯运用量子公式来阐述原子结构。

哈斯的论文发表于 1910 年。他在汤姆生模型的基础上，设想电子在

---

[1] J.J.Thomson,Phil.Mag.7(1904)p.237.

原子内部以振荡频率 v 旋转，运用普通力学公式计算原子的能量。设原子的半径为a，电子的轨道半径为r，则电子受力为$\frac{e^2 r}{\alpha^3}$，动能为$\frac{e^2 r^2}{2\alpha^3}$。他又大胆地作个近似，取$r = a$，则电子动能为$\frac{e^2}{2\alpha}$。位能等于动能，所以总能量为$\frac{e^2}{\alpha}$。

再从作用力求频率。设电子作简谐运动，则受力应为

$m \cdot 4\pi^2 v^2 r$，

而$m \cdot 4\pi^2 v^2 r = \frac{e^2 r}{\alpha^3}$，

所以$v = \frac{e}{2\alpha\pi(am)^{1/2}} = \left[\frac{e}{4\alpha^3\pi^2}\left(\frac{e}{m}\right)\right]^{1/2}$

哈斯将a，e，$\frac{e}{m}$和h的实验值代入上式，得$\frac{e^2}{\alpha}$与hv的比值在0.70至1.92之间。于是，他得出近似结果，认为 hv 与原子的总能量大概相等。

再令$hv = \frac{e^2}{\alpha}$，得：$h = \frac{e^2}{\alpha} / \frac{e}{2\alpha\pi(am)^{1/2}}$

所以$h = 2\pi e\sqrt{\alpha \cdot m}$

这个结果虽然十分粗略，但却是将量子假说运用于原子结构的最初尝试。

哈斯的文章受到了洛仑兹的注意，后来，洛仑兹曾把哈斯的工作介绍到 1911 年的第一届索尔威会议上，引起了与会者的兴趣，大家对这个问题还进行了一番讨论。

8.1.6 尼科尔松的量子化原子模型

尼科尔松（J. W. Nicholson）是英国颇有名气的数学和天文物理学家，擅长于星光光谱和日冕光谱的研究。1911—1912 年间，他发表了一系列关于天体光谱的论文，其中也讨论到原子模型。他认为恒星和太阳这样高温的物体，原子应具有特殊的状态，这时电子的能量会高到电子环的半径远大于原子的半径。他认为对这种状态卢瑟福的有核模型和汤姆生的实心带电球模型可看成是一致的。他假设天体中除了氢和氦以外，还有两种最简单的元素，叫 Nebulium 和 Protofuorine，它们的原子分别具有 4e 和 5e 的电子。这些电子组成环。他从力学原理计算系统的能量，发射能量与振动频率之间有一确定的比值，这使他想到可以把原子看成普朗克振子。他说[①]：

“由于这一类原子系统的能量的可变部分与 $mn\alpha^2\omega^2$ 成正比(其中 m 是电子质量，n 是电子数，a 是电子环半径，ω是振动角频率），E/频率

[①] J.W.Nicholson,Month.Roy.Roy.Astro.Soc.(London)72（1911）p.679.

$=mnf\alpha^2\omega$或 mnav，即等于电子绕核旋转的总角动量。所以，如果普朗克常数，像索末菲所主张的那样，有原子意义，也就意味着当电子离开或返回时，原子的角动量只能以一分立值来增减。”

这正是玻尔后来在原子理论中得到的一条重要结论，玻尔在第一篇论文中还特地提到尼科尔松。

不过，尼科尔松只是照搬普朗克的振子概念，认为辐射的光频率就是振子的振动频率，也就是说，原子以什么频率振动，就以什么频率发射，于是不得不对光谱系的分立值武断地解释为：“一个谱系的各条谱线也许不是由同一个原子发出，……而是由不同的原子，其内在的角动量由于辐射或其它原因而受到阻滞，因此与标准值相差某些分立值。例如，氢原子就可能有好几类，这几类的化学性质甚至重量都相等，只是内部运动不同而已。”他这样解释分立的线光谱，当然不可能成功。

以上列举了几例在玻尔之前的原子模型，这些模型虽然都失败了，但给后来者提供了有益的启示。下面再介绍卢瑟福创立有核模型和玻尔提出定态跃迁模型的经过。

§8.2　α散射和卢瑟福有核原子模型

卢瑟福在 1898 年研究放射性时发现α、β射线，并经过多年工作，在 1908—1909 年证明α粒子就是氦离子 He^{++}，（详见第 11 章）。他在研究α射线对物质的作用时，发现α射线在底片上形成的图象会由于极薄物质的散射作用而变得边缘模糊。根据 J.J.汤姆生的散射理论可以解释这个现象。

1908 年卢瑟福的助手盖革（H.Geiger，1882—1945）在用闪烁法观测α散射时，发现金箔的散射作用比铝箔强。卢瑟福建议盖革系统地考察不同物质的散射作用，以便在“这些物质的散射能力和遏止能力之间建立某种联系”，并让学生马斯登（E.Marsden）协助工作。他们的α射线管长达 4 米，本来是希望使α射束尽量地窄，以便测出准确数据。然而，出乎意料地却在闪锌屏上总出现不正常的闪光，有可能是经管壁反射所致。为此，卢瑟福建议他们试试让α粒子从金属表面上直接反射，这就导致了马斯登发现了α射线大角度散射的惊人结果。1909 年，他们报导说：

“α粒子的漫反射取得了判决性证据。一部分落到金属板上的α粒子方向改变到这样的地步，以致于重现在入射的一边。”α粒子经反射后落到闪锌屏上，平均角度为 90°，在屏上不同位置统计反射粒子数，得到“入射的α粒子中每 8000 个粒子有一个要反射回来”的统计结果[①]。

[①] H.GeigerandE.Marsden,Proc,Roy.Soc.A82(1909)p.495.

当卢瑟福知道这个结果时，实在难以置信，因为这无法用 J.J.汤姆生的实心带电球原子模型和散射理论解释。即使用汤姆生后来提出的多次散射理论，也只能定性地说明这一反常现象，而多次散射的几率则小到微不足道，比 1/8000 的结果相差太远了。

卢瑟福对这个问题苦思了好几星期，终于在 1910 年底，经过数学推算，证明“ 只有假设正电球的直径小于原子作用球的直径，a 粒子穿越单个原子时，才有可能产生大角度散射。 ”

1911 年，卢瑟福在《哲学杂志》上发表了题为《物质对α、β粒子的散射和原子构造》的论文，他写道[①]：

“ 众所周知，α、β粒子与物质原子碰撞之后将从其直线运动偏折。对于β粒子，要比α粒子散射得更厉害，因为β粒子的动量和能量小得多。这些快速运动粒子的轨道会穿越原子，并且观测到的偏折是由于原子系统中存在着强电场，这两点似已无疑问。一般都假设，α、β射线在穿过物质薄片时遭到的散射是由于物质原子多次微弱散射的结果。但是盖革和马斯登的α射线散射观测却表明α射线有一部分经单次碰撞必定会遭到大于直角的偏折。例如他们发现，入射α射线的一小部分，大约两万分之一，在穿过约 0．00004 厘米厚的金箔时发生了平均为 90 ° 角的偏折。盖革随后证明，α射线束穿过这样厚的金箔，其偏折角的最可几值约为 0.87 ° 。根据概率论作一简单计算，表明α粒子偏折到 90 ° 角的机会是极小的。另外，可以看到，如果把大角度偏折看成是多次小偏折造成的，则α粒子的大角度偏折应按期待的概率规律有一定分布，（但实际上）并不服从这个概率规律。似乎有理由假设，大角度偏折是由于单个原子碰撞，因为第二次碰撞能产生大角度偏折的机会在大多数情况下是极为微小的。简单的计算表明，原子一定是处于强大电场的位置中，以致于一次碰撞竟能产生这样大的偏折。 ”

卢瑟福接着写到：“ 由于α、β粒子穿越原子，应有可能从周密研究偏折的性质中，形成原子结构的某些概念，正是这种结构产生出上述效应。实际上，高速带电粒子受物质原子的散射是解决这个问题的最适宜的方法之一。 ”

然后，卢瑟福从理论上探讨能够产生 a 粒子大角度偏折的简单原子模型，再将理论推出的结果与当时的实验数据比较。

图 8-3 是卢瑟福的理论推导用图。他首先假设，对于小于 10^{-12} 厘米的距离，中心电荷和 a 粒子的电荷都可看成是集中在一点。 ”“ 设粒子沿 PO 方向进入原子，离开原子时沿 OP '运动，而 A 是抛物线的拱点，p=SN=原子中心 S 到粒子原方向的垂直距离。 ”

■图 8-3 卢瑟福（1911 年）理论推导图

[①] E.Rutherford,Phil.Mag.21(1911)p.669.

经过推导，得出落在偏折角为φ的方向单位面积上的 a 粒子数

$$y = \frac{ntb^2 \cdot Q \cdot \csc^4(\phi/2)}{16r^2}$$

式中 n 为物质单位体积的原子数，t 为其厚度，Q 为落在散射物质的粒子总数，φ为偏折角，φ=π-2θ，r 为 a 射线在散射物质上入射点到硫化锌屏的距离，系数$b = \frac{NeE}{\frac{1}{2}mu^2}$（Ne为原子中心的电荷，E为a粒子的电荷，$\frac{1}{2}mu^2$为a粒子的平均动能）。

“由此式可见，a 粒子在距入射点 r 处的硫化锌屏上的闪烁数正比于：

$(1)\csc^4$（$\frac{\phi}{2}$）或$\frac{1}{\phi^4}$（设φ很小）；

(2)散射物质的厚度 t(设 t 很小）；

(3)中心电荷量 Ne；[②]（注）(4)反比于（mu²）²，或反比于速度的四次方（设 m 为常数）”。卢瑟福将盖革和马斯登的初步数据与这些推论比较，基本相符。

接着，盖革和马斯登对 a 散射实验又作了许多改进，在 1913 年发表了全面的实验数据，进一步肯定了卢瑟福的理论[①]。

卢瑟福提出有核原子模型是经过深思熟虑的。他清楚地知道，这个模型面临与经典理论相矛盾的危险，因为正负电荷之间的电场力无法满足稳定性要求。卢瑟福在论文最后特别提到“长岗曾从数学上考虑过‘土星’原子的性质”，他肯定知道长岗的土星模型和佩兰 1901 年提过的核模型都因上述困难而未获成功。但他却大胆地坚决地站在他们这一边，勇敢地向经典理论挑战，因为他有大角度 a 散射的实验事实作为依据。他相信自己的散射理论要比 J.J.汤姆生的散射理论更具有普遍性，既能解释 a 大角度散射，又能解释β散射，是经得起实践检验的。不过，在论文中他的提法很慎重，只是确认“正电荷集中在原子中心”这一点，没有作更多的推断。至于稳定性问题，他并不讳言，在论文一开始，就申明：“在现阶段，不必考虑所提原子的稳定性，因为显然这将取决于原子的细微结构和带电的组成部分的运动。”

卢瑟福有自知之明，知道自己的原子模型还很不完善。1911 年 4 月 11 日在给友人波尔特武德（Boltwood）的信中写道：“希望在一、二年内能对原子构造说出一些更明确的见解。”

卢瑟福严谨的科学态度，从他的著作中也可看出一二，不论是 1911

[②] 注 原文如此。

[①] 详见郭奕玲、林木欣、沈慧君编著，近代物理发展中的著名实验，湖南教育出版社，1990 年，第十五章

年的论文，还是 1913 年的专著[①]都没有“核”这个词。在那本 700 页的专著中，只有 4 页介绍这个重要问题。不过他很中肯地指出：

“从原子内部结构获取信息的最有力的方法之一，在于研究高速粒子穿过物质的散射，例如α和β粒子。由于它们的巨大运动能量，高速α或β粒子一定会穿过挡在其路途中的原子。与原子碰撞的结果就使带电粒子偏离其直线轨道，这就可以搞清楚原子中造成偏折的电力的强度和分布。”

卢瑟福的方法和理论开辟了一条正确研究原子结构的途径，为原子科学的发展树立了不朽的功勋。然而在它提出之初，竟遭到了为时不短的冷遇。例如，1911 年第一届索尔威国际物理讨论会，卢瑟福参加了，但在会议记录中竟没有提到卢瑟福的新近工作。1913 年，J.J.汤姆生在作原子模型系列讲座时，也没有提到。有人查过当年的报刊文献，对卢瑟福的原子模型理论几乎没有任何反响。也许当时人们觉得卢瑟福的理论过于粗糙，把它置于形形色色的假说和猜想之列，认为它无非是一种说法而已，所以不值得一提。

然而，以卢瑟福为核心的曼彻斯特大学物理实验室的同事们继续坚定地走下去。盖革和马斯登为检验卢瑟福散射理论进行了系统实验研究，全面肯定了这个理论的正确性，从丹麦来的玻尔（Niels Bohr）十分敬佩卢瑟福和他的学说。玻尔把放射现象解释为核的反应；将量子学说应用于有核模型，并且成功地解释了氢原子光谱；依万士（E.J.Evans）的氦光谱实验证实了玻尔关于匹克林（Pickering）谱系的预见。莫塞莱（H.G.J.Moseley）测定各种元素的 X 射线标识谱线，证明它们具有确定的规律性，为卢瑟福和玻尔的原子理论提供了有力证据。到 1914—1915 年，这个理论终于得到了世人的公认。

§8.3　玻尔的定态跃迁原子模型和对应原理

尼尔斯·玻尔是丹麦人，早年在哥本哈根大学攻读物理，1909 和 1911 年作硕士和博士论文的题目是金属电子论，在这过程中接触到量子论，1911 年，赴英国剑桥大学学习和工作，1912 年在曼彻斯特大学卢瑟福的实验室里工作过四个月，其时正值卢瑟福发表有核原子理论并组织大家对这一理论进行检验。玻尔参加了 a 射线散射的实验工作，帮助他们整理数据和撰写论文。玻尔很钦佩卢瑟福的工作，坚信他的有核原子模型是符合客观事实的，也很了解他的理论所面临的困难，认为要解决原子的稳定性问题，唯有靠量子假说，也就是说，要描述原子现象，就必须对经典概念进行一番彻底的改造。正在他日夜苦思之际，他的一位朋友

[①] E. Rutherford, Radioactive Substances and their Radiations, Cambridge,1913.

汉森向他介绍氢光谱的巴耳末公式和斯塔克的著作。后来，玻尔回忆道："当我一看到巴耳末公式，我对整个事情就豁然开朗了。"他从斯塔克的著作学习了价电子跃迁产生辐射的理论，于是很快就写出了著名的"三部曲"，题名《原子构造和分子构造》——Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的三篇论文，发表在 1913 年《哲学杂志》上。在第一篇的开头，玻尔写道[①]：

"近几年来对这类问题的研究途径发生了根本的变化，由于能量辐射理论的发展和这个理论中的新假设从实验取得了一些直接证据，这些实验来自各不相同的现象，诸如比热、光电效应和伦琴射线等等。这些问题讨论的结果看来一致公认经典电动力学并不适于描述原子规模的系统的行为。不管电子运动定律作何变动，看来有必要引进一个大大异于经典电动力学概念的量到这些定律中来。这个量就叫普朗克常数，或者是经常所称的基本作用量子。引进这个量之后，原子中电子的稳定组态这个问题就发生了根本的变化，……"

下面简要介绍玻尔是怎样提出他的定态跃迁原子模型理论的。

他在第一篇论文中，首先作了一个粗略估算，证明从他的假设推算出的结果，与实验定量相符：

设电子沿椭圆定态轨道绕核旋转时无能量辐射，旋转频率为ω，轨道主轴为 2a。将电子移到无穷远，要给以能量 W，则

$$\omega = \frac{\sqrt{2}W^{3/2}}{\pi eEm^{1/2}}，\quad 2\alpha = \frac{eE}{W} \qquad (8-1)$$

内（-e）与 E 分别为电子与核的电荷。

从普朗克辐射理论得知，频率为 v 的原子振子一次辐射的能量等于 nhv，内 n 为正整数。

假设电子原来在距核极远处，相互作用后进入定态轨道。假设因此发射出的辐射频率 v 等于电子沿这一轨道的旋转频率ω的一半，（原来旋转频率为 0），即令

$$W = nh \cdot \frac{1}{2}\omega， \qquad (8-2)$$

则由(8-1)式得：

$$W = \frac{2\pi^2 me^2E^2}{n^2h^2}，\quad \omega = \frac{4\pi^2 me^2E^2}{n^3h^3}，\quad 2a = \frac{n^2h^2}{2\pi^2 meE} \qquad (8-3)$$

其中 n=1，2，3，……。一系列的 W，ω和 a 值相应于不同的系统组态。他写道：

"在上式中取$n = 1$，$E = e$，引进实验值$e = 4.7\times10^{-10}$，$\frac{3}{m} = 5.31\times10^{17}$，$h=6.5\times10^{-27}$，得，

[①] N.Bohr,Phil.Mag.,26(1913)p.1

$2a=1.1\times10^{-8}\text{cm}$，$\omega=6.2\times10^{15}\text{s}^{-1}$，$\frac{W}{e}=14\text{V}$。“我们看到，这些数值与原子的线度，光的频率和游离电位具有相同的数量级。”

玻尔继续讨论氢原子。对于氢原子，形成某一定态所辐射的总能量为

$$W_n=\frac{2\pi^2me^4}{h^2n^2}$$

系统从 $n=n_1$ 态过渡到 $n=n_2$ 态，放射的能量为：

$$W_{n_2}-W_{n_1}=\frac{2\pi^2me^4}{h^2}\left(\frac{1}{n_2^2}-\frac{1}{n_1^2}\right)=hv$$

由此得：

$$v=\frac{2\pi^2me^4}{h^3}\left(\frac{1}{n_2^2}-\frac{1}{n_1^2}\right)\qquad(8-4)$$

“我们看到，这个式子解释了氢光谱线的规律。取 $n_2=2$，令 n1 可变，得普通的巴耳末系。取 $n_2=3$，则得帕邢在红外区观测到的、里兹早先预言过的谱系。如取 $n_2=1$ 和 $n_2=4$，5…，将分别得到远紫外区和远红外区的谱系，这些谱系都尚未观测到，但它们的存在却是可以预期的。

“相符性不仅是定性的，而且是定量的。取

$$e=4.7\times10^{-10}\text{，}\frac{e}{m}=5.31\times10^{17}\text{，}h=6.5\times10^{-27}$$

得 $\frac{2\pi^2me^4}{h^3}=3.1\times10^{15}$

式（8-4）括号外因子的观测值为 3.290×10^{15}。”

玻尔于是声称，“理论值和观测值之间的相符在这些常数所引入的误差范围之内”。

然后玻尔提出在上述计算中用到的两条基本假设，即：

“（1）体系在定态中的动力学平衡可以藉普通力学进行讨论，而体系在不同定态之间的过渡则不能在这基础上处理；

“（2）后一过程伴随有均匀辐射的发射，其频率与能量之间的关系由普朗克理论给出。”

玻尔认为第一条假设是理所当然的，而第二条假设则是解释实验事实所必需的。

玻尔进而推出了角动量量子化的重要结果，在这里他运用了在以后经典量子论中一直起指导作用的“对应原理”。下面简述他的论证方法：

设辐射的总能量与电子在不同定态下旋转的频率之间的比可用方程 $W=f(n)\cdot h\omega$ 表示，按照前面的方法进行推导，方程（8-3）就变成

$$W=\frac{\pi^2me^2E^2}{2h^2f^2(n)}\text{，}\omega=\frac{\pi^2me^2E^2}{2h^3f^3(n)}$$

假设体系从 $n=n_1$ 过渡到 $n=n_2$，发射的能量等于 hv，则

$$v = \frac{\pi^2 me^2 E^2}{2h^3}\left(\frac{1}{f^2(n_2)} - \frac{1}{f^2(n_1)}\right)$$

与巴耳末公式比较，只有取 f(n)=Kn。

“为了求得 K 值，我们来考虑两相邻定态 n=N 与 n=N-1 之间的过渡，引入 f(n)=Kn，得辐射的频率：

$$v = \frac{\pi^2 me^2 E^2}{2K^2 h^3} \cdot \frac{2N-1}{N^2(N-1)^2}$$

辐射的前后，电子旋转频率分别为：

$$\omega_N = \frac{\pi^2 me^2 E^2}{2K^3 h^3 N^3}，\omega_{N-1} = \frac{\pi^2 me^2 E^2}{2K^3 h^3 (N-1)^3}$$”。

“如果 N 很大，发射前后频率之比将非常接近于 1。根据普通电动力学应能期望辐射频率与旋转频率之比也非常接近于 1。这一条件只有当$K = \frac{1}{2}$才能满足。”

这样，玻尔用对应原理推证出了一开始作出的假设，即

$$W = \frac{1}{2} n \cdot h\omega$$

再根据圆轨道的力学关系：

$$\pi M = \frac{T}{\omega}$$

内 M 为电子绕核旋转的角动量，T 为电子的动能。而

T=W

∴ $\pi M = \frac{1}{2} nh$

得 $M = nM_0$

内 $M_0 = \frac{h}{2\pi} = 1.04 \times 10^{-27}$

这就是现在通用的表示式： $M = nh$

玻尔 1913 年第二篇论文，就以角动量量子化条件作为出发点来处理氢原子的状态问题，得到能量、角频率和轨道半径的量子方程。

由上可见，玻尔的对应原理思想早在 1913 年就有了萌芽，并成功地应用于原子模型理论。1916 年，他曾写过一篇题为《论量子论对周期体系的应用》的论文，文中明确叙述了对应原理的基本思想。可是这篇论文没有及时发表。正当玻尔收到这篇论文的校样时，他读到了索末菲（ArnoldJohannesWilhelmSommerfeld,1863—1951）讨论量子理论的两篇重要论文。于是他决定先研究索末菲的工作，将自己的论文作重大修改后，再送出发表。可是，这篇论文一直拖到 1922 年才完稿。由于这个缘故，世人往往以为对应原理是 1923 年才提出的。其实，这条原理一直是玻尔和他的学派研究量子理论的指导思想之一。

玻尔的原子理论取得了巨大的成功，完满地解释了氢光谱的巴耳末

公式；从他的理论推算，各基本常数如 e、m、h 和 R（里德伯常数）之间取得了定量的协调。他阐明了光谱的发射和吸收，并且成功地解释了元素的周期表，使量子理论取得了重大进展。玻尔之所以成功，在于他全面地继承了前人的工作，正确地加以综合，在旧的经典理论和新的实验事实的矛盾面前勇敢地肯定实验事实，冲破旧理论的束缚，从而建立了能基本适于原子现象的定态跃迁原子模型。下面的图表摘自洪德（F.Hund）著：《量子理论史》[①]，对玻尔理论的渊源作了精辟的分析。

■

§8.4 索末菲和埃伦费斯特的贡献

8.4.1 玻尔理论的局限性

1913 年玻尔一举对氢原子光谱和类氢离子光谱的波长分布规律作出完满解释，随后又得到多种渠道的实验验证，使卢瑟福-玻尔原子模型以及能级、定态跃迁等概念逐渐得到了人们的承认。然而，从玻尔的理论却无法计算光谱的强度，对其它元素的更为复杂的光谱，包括氦原子光谱在内，往往理论与实验分歧很大。至于塞曼效应，光谱的精细结构等实验现象，玻尔理论更是无能为力。显然，事情正如玻尔所料，他的理论还很不完善，原子中电子的运动不可能象他所假设的那样简单，但是就在处理这一最简单的模型中，找到了一条将量子理论运用于原子结构的通道。他的初步成功吸引了不少物理学家试图改进他的理论，并推广到更复杂的体系中去。

8.4.2 推广玻尔理论的初步尝试

在没有建立量子力学和发现电子自旋之前，所有这些努力往往是在经典力学上加某些量子条件而已，并未能根本摆脱玻尔理论所面临的困境。时至今日，某些理论已经只有历史意义，早已被量子力学代替，但是回顾旧量子论这一段发展历史，可以帮助我们认识经典物理学到量子力学的过渡，并了解至今仍在应用的某些概念的起源。

早在玻尔的原子理论出现之前，物理学家就认识到将量子假说推广到多自由度的体系的必要性。普朗克的量子假说就建立在线性谐振子的基础之上，只有一个自由度。1911 年在第一届索尔威会议上，当讨论普朗克题为《黑体辐射定律和基本作用量子假说》的报告时，彭加勒提出过这样的问题，他问普朗克处理谐振子的量子条件怎样才能用于多于一个自由度的体系。普朗克在回答中表示有信心在不久的将来做到这一点。

果然不出 4 年，这一工作由好几个人作了出来，除了普朗克外，还

[①] F.Hund,The History of Quantum Theory, Bibliographisches，德文版,1967;英文版,1973.

有著名理论家索末菲（他当时也参加了索尔威会议）以及英国的威尔逊(WilliamWilson，1875—1965)和日本的石原纯(Ishi-wara，1881—1947)，他们有的立即用之于玻尔原子理论，有的与玻尔理论没有直接联系。索末菲则全面推广和发展了玻尔的原子理论。

普朗克一直在考虑如何将量子假说推广到多自由度，他曾在 1906 年提出相空间理论。1915 年他在德国物理学会上发表了《具有多自由度的分子的量子假说》的论文。他考虑有 f 个自由度的原子体系,用由整数规定的一组曲面 F(pk，qk)=const，把相空间分割成一些小区域，他认为定态就相当于这些曲面的 f 维交点。他也曾讨论过电子在正核的库仑场中运动的情况，但没有用于玻尔原子理论，因为他不相信分立态的基本假设。

威尔逊是英国国王学院的助教、他在 1915 年发表的论文《辐射的量子理论和线光谱》中表示希望能够用单一形式的量子理论推导出普朗克和玻尔的结果。他的方法奠基于两个假设：一是动力体系（原子）和以太的相互作用以不连续的方式发生，二是在不连续变化之间体系可用哈密顿力学描述，但需满足下式：

$$\int p_i dq_i = n_i h \quad (i = 1、2、3、\cdots)$$

其中 n_i 为正整数，积分路径遍及力学变量 p_i 及 q_i 的所有值。由此，威尔逊推出了普朗克的谐振子平均能量公式，接着又得到了玻尔的电子动能公式和玻尔的频率公式即巴耳末公式。

日本物理学家石原纯，早年在德国求学，曾受教于爱因斯坦和索末菲，对相对论和量子论都很有兴趣。1915 年，他回到日本任教，在《东京数学物理学报》上发表题为《作用量子的普遍意义》的论文，文中写道[①]：

“假设有一小块物质实体，或一组数量极大的小物体，正处于稳定的周期运动状态或正处于统计平衡，令其状态完全由坐标 q_1、$q_2 \cdots q_f$ 和相应的动量 p_1、$p_2 \cdots p_f$ 决定。在自然界中，运动往往以这样的方式发生，即：每一状态面 q_i、p_i 可以以同样的几率分解成一些区域，这些区域在相空间的某一给定点上的平均值：

$$\frac{1}{f}\sum_{i=1}^{\infty} p_i dq_i = h$$

等于一普适常数。”

不过，由于石原纯将两个自由度用于围绕核旋转的电子的运动，他推出的巴耳末公式竟要求氢原子带两个正电荷，因而中性的氢原子该含两个电子。对此石原纯并不介意，他似乎比较赞成尼科尔松的原子理论。

---

① 转引自 J.Mehra,H.Rechenberg,The Historical Development of Quantum Theo-ry, vol.1, Partl, Springer-Verlag,1982 p.210.

普朗克、威尔逊和石原纯虽然都没有得到具体成果，但他们的努力对于量子论的发展起到了促进作用。

8.4.3 索末菲全面推广玻尔理论

和上述理论家的工作几乎同时，索末菲在 1915 年独立地提出了自己的理论。索末菲是德国慕尼黑大学的著名理论物理教授，他擅长理论分析。早年在博士论文工作中就发展了新的数学方法——复变函数方法。后来在应用这个方法中取得多项成就。20 世纪初他曾对电子理论作过系统研究。很早他就在论战中站在相对论一边。

1911 年，索末菲开始卷入量子论的工作，也尝试用一种新的量子假说来解释非周期过程，不过没有取得实际成果。不久，帕邢和拜克(ErnstBack)研究强磁场作用下的塞曼效应，他们的发现（即帕邢-拜克效应）吸引索末菲把洛仑兹弹性束缚电子理论推广到反常塞曼效应。正好这时，他收到了玻尔在《哲学杂志》1913 年 7 月那一期上发表的第二篇论文的抽印本。他立即给年轻的玻尔写信，信中写道[①]：

“谢谢您寄赠大作，我已在《哲学杂志》上读过了。我曾长期考虑如何用普朗克常数表示里德伯-里兹常数的问题，几年前我曾跟德拜讨论这个问题。尽管我对各种原子模型仍然有某种怀疑，但无疑这一常数的计算是一很大成就。”

索末菲在 1914 年冬季开设系列讲座：《塞曼效应和光谱线》。这一讲座成了讲述玻尔理论的课程，就在这一课程中，索末菲广泛讨论了玻尔理论的推广,其中包括椭圆轨道理论和相对论修正。他的讲稿迟至 1915 年底才交付出版，部分原因是想等爱因斯坦的意见。因为这时正值爱因斯坦发展了广义相对论，他不知道爱因斯坦的新理论会不会影响对玻尔原子理论的修正，直至接到爱因斯坦答复说不影响时，他才正式向巴伐里(Bavarian)科学院提交这方面内容的报告。

索末菲首先把氢原子中电子的开普勒运动看成是二维问题，引入平面极坐标，在轨道平面内以矢径 Y 和方位角 ψ 表示这个运动。他假设不仅 ψ，而且 Y，都要服从量子条件，即：

$$\oint p_r dr = n'h,$$

与

$$\oint p_\psi d\psi = kh,$$

内 n′为辐向量子数，k 为方位量子数。索末菲还推出：

$$k/(k+n')=b/\alpha,$$

内 a、b 分别为椭圆的长半径和短半径，并证明相应的定态轨道能量为：

$$E=-Rhc/(k+n')^2$$

对类氢原子，Z＞1，则

[①] 转引自 J.Mehra,H.Rechenberg,The Historical Development of Quantum Theo- ry, vol.1, Partl,Springer-Verlag,1982 p.213.

$$E=-RhcZ^2/(k+n')^2$$

其中 k=0 相当于电子以直线轨道穿过原子的核，应除去。于是 k+n′的系列值就与玻尔公式：

$E=-Rhc/n^2$ 中的 n 一致。

由此可见，尽管椭圆轨道比圆轨道复杂，却没有引起任何附加能级。

索末菲接着又把这个问题看成是三个自由度的体系，为此他引入了极坐标γ、θ与ψ，以核为原点，γ表矢径，θ表纬度，ψ表方位，取量子条件：

$\oint p_r dr = n'h$，$\oint p_\varphi d\varphi = n_1 h$，$\oint p_\theta d\theta = n_2 h$比较用γ、θ、ψ表示的动能和用 r、ψ表示的动能，发现：

$k=n_1+n_2$

由于总角动量$P_\psi = \frac{kh}{2\pi}$，垂直于轨道平面，而其在极轴上的投影为 P_ψ，索末菲得出：

$n_1=k\cos\alpha$，或 $\cos\alpha=n_1/(n_1+n_2)$，

其中α是 P_ψ与极轴间的夹角。这一方程表示轨道平面与极轴之间的倾角存在分立性，这就是“空间量子化”。如果极轴有一确定方向，例如由于外磁场和外电场而确定了方向，则这个关系具有明确的物理意义。空间量子化是索末菲提出的一个重要概念，可以对斯塔克效应和塞曼效应提供相当满意的描述。后来，朗德(AlfredLandé)和斯梅卡尔(AdolfSmekal)甚至还用之于解释 X 射线谱，讨论氦光谱等等。及至 1922 年，斯特恩(OttoStern)和盖拉赫(WaltherGerlach)用他们的银原子束在不均匀磁场中证实了空间量子化的实际存在。

然而，空间量子化并不能解释氢光谱的精细结构。索末菲将相对论用于电子的周期运动，证明电子在有心力的作用下将作玫瑰花环形的运动，或者作近日点缓慢进动和以原子核为集点之一的椭圆运动。他用分离变量法求解哈密顿-雅可比微分方程，再用傅里叶级数展开，得到能量：

$$E_{nk} = -Z^2 Rhc\left[\frac{1}{n^2}+\frac{a^2Z^2}{n^4}\left(\frac{n}{k}-\frac{3}{4}\right)\right]$$

如取 n=k，Z=1，就是玻尔理论的最初结果。

上式中的第二项是相对论修正，由此证明能量是 n、k 的函数，能级确是多重的。

就这样，索末菲对氢谱线的精细结构作出了理论解释。从上式可以看到，附加项与 Z^4 成正比，氦光谱应比氢光谱更容易观测到精细结构。果然，1916 年帕邢报导说，他的氦谱精密测量与索末菲的预见定量相符，相差不超过 10^{-3}Å。

附带指出一点，帕邢的氦谱精密测量对爱因斯坦的狭义相对论也起

了间接验证的作用，因为根据阿伯拉罕的“刚性电子”理论推导出的氦谱分裂，与帕邢的观测结果根本不符。

1919 年，索末菲出版了《原子结构与光谱线》一书，系统地阐述了他的理论。1920 年他进一步对碱金属的谱线作出解释。索末菲开创的用相对论处理原子问题的方法后来又经过许多人的研究，继续有所进展，但仍然存在许多障碍，例如光谱强度问题、反常塞曼效应问题等等，看来根本的出路在于建立一套适合于微观体系的崭新理论，靠修补是无济于事的。

在这里，要说明一个重要问题。不论是普朗克、威尔逊、石原纯还是玻尔与索末菲，他们总以$\int pdg = nh$或其推广形式作为量子条件。他们的理论根据是什么？能不能给出证明？索末菲曾申明，这些条件是无法证明的。应该说，他是正确的，因为直到 1926 年，当量子力学出现后，才能借 WKB 法经近似展开后推导出这一关系。20 世纪 20 年代之前当然只能作为假设提出。

其实，这一量子条件的提出和推广并不是偶然的，它有深刻的物理涵义。其理论支柱就是“浸渐原理”(AdiabaticPrinciple)。

8.4.4 埃伦费斯特和他的浸渐原理

如果说，玻尔的对应原理是在经典物理学和量子力学之间架起的一座桥梁，那么，埃伦费斯特(PaulEhrenfest,1880—1933)的浸渐原理则是两者之间的又一座桥梁。

“浸渐(Adiabatic)”表示无限缓慢的变化过程，也可译“绝热”，但意义不够准确。这个概念起源于玻尔兹曼和克劳修斯企图将热力学第二定律还原为纯力学的尝试。玻尔兹曼在 1866 年证明，假如制约力学体系行为的定律服从最小作用原理，则周期为 τ 的简单周期性体系的动能为：

$$2d(\tau\overline{E}_k)/\tau,$$

内$\overline{E}_k = \left(\frac{1}{\tau}\right)\int_0^\tau E_k dt$为体系的平均动能，所以如果外界不提供能量（相当于绝热过程$dQ = 0$），则比值$\overline{E}_k / v$应为不变量[①]。

1871 年，克劳修斯重申了这一论点，并且指出研究渐变过程的重要性。后来，赫姆霍兹和 H.赫兹对浸渐变化续有研究。1902 年瑞利指出，某些简谐振动系统，例如摆长缓慢缩短的单摆，或正在作横向振动并缓慢被一窄环遮蔽的弦，或缓慢收缩的空腔中的驻波，就会产生这类“浸渐运动”。他还证明在这类过程中，能量和频率之比保持不变。

1911 年，洛仑兹提出过这样的问题：一个量子化的摆，当他的弦缩

[①] M.Jammer,The conceptual Developmant of Quantum Mechanics,McGraw- Hill, 1966, p.97.

短时，是否仍处于量子状态？对此，爱因斯坦回答说：“如果摆长无限缓慢地变化，则摆的能量将保持等于 hν，如果它原来是 hν 的话。”

就在这个时候，埃伦费斯特已经认识到浸渐不变性概念对量子理论的重要性。他大约是在 1906 年开始研究普朗克辐射定律的统计力学基础时，就对这个理论的逻辑缺陷感到极大的疑虑。为此，曾于 1912 年专程走访爱因斯坦。爱因斯坦对他的思想给予很高评价，1914 年称埃伦费斯特的原理为“浸渐假说”。

埃伦费斯特是奥地利人，生于 1880 年，在维也纳大学听过玻尔兹曼讲授热的分子运动论。1904 年获博士学位后从事统计物理学研究。鉴于他出色的理论素养，洛仑兹在 1912 年推荐他接任自己在荷兰莱顿大学的教授职务。此后，埃伦费斯特一直在莱顿大学主持工作。

1912 年底，埃伦费斯特在与洛仑兹的通信中提出一个重要思想，他写道[①]：“一个被镜面器壁限制的体积，里面充满了辐射，正在作无限缓慢的压缩，对所有振动模式来说，有一个量 E/ν 应保持常数，故可写为 δ(E/ν)=0（内'为‘浸渐、可逆’变量）”，他问道：“假如从简谐振动变换到别的周期运动，什么量(可以代替 E/ν)在‘浸渐可逆’过程中保持常数呢？”

1913 年，埃伦费斯特的论文经洛仑兹介绍发表在荷兰的阿姆斯特丹科学院学报上，题为《玻尔兹曼的力学理论及其与能量子理论的关系》，他提出一条原理：两相互以浸渐变换联系的体系 A、B 之间存在如下关系：

$$\frac{\overline{T}_A}{\upsilon_A} = \frac{\overline{T}_B}{\upsilon_B}$$

内$\overline{T}_A$、$\overline{T}_B$为体系A、B的平均动能，υ_A、υ_B为其频率。也就是说，从无限缓慢变化的一个或几个参量，可以使不同体系在它们之间相互导出。这些参量，埃伦费斯特称为浸渐不变量。

浸渐原理揭示了量子化条件的奥秘。因为玻尔在不久前提出的量子化条件(8.2)式：2W/ω=nh 及由此推出的角动量量子化条件 M=nh/2π 都是埃伦费斯特的浸渐不变量。而索末菲的结果，在埃伦费斯特看来，也是理所当然的，因为作圆形轨道的氢原子和椭圆形轨道的氢原子是通过浸渐过程互相联系着的两种状态，所以$\overline{E}_k$应该相等。

玻尔充分肯定埃伦费斯特的贡献，承认在自己后来的工作中浸渐原理起了很重要的作用。1918 年，他给埃伦费斯特的信中写道：“您可以看到，这些内容（指玻尔当时发表的论文）在很大程度上是基于您的重要原理——浸渐不变性原理。不过根据我的理解，我是从多少有点不同的观点来考虑问题。因此我没有用您的原始论文所用的那些词汇。在我

[①] 转引自 J.Mehra,H.Rechenberg,TheHistoricalDevelopmentofQuantumTheo- ry, vol.1,Partl,Springer-Verlag,1982 p.234.

看来，定态之间运动的连续转变条件可以看成是保证这些状态稳定性的直接结果，其主要问题在于如何判断将普通‘力学’用于计算体系的连续转变效应的正确性。因为我似乎以为，不太可能把这一判断完全置于热力学的考虑，而很自然地应从用普通力学计算定态与实验的一致性上进行判断。”

第九章　波粒二象性

第一个肯定光既有波动性又有微粒性的是爱因斯坦。他认为电磁辐射不仅在被发射和吸收时以能量 hv 的微粒形式出现，而且在空间运动时，也具有这种微粒形式。爱因斯坦这一光辉思想是在研究辐射的产生和转化时逐步形成的。与此同时，实验物理学家也相对独立地提出了同样的看法。其中有 W.H.布拉格和 A.H.康普顿(ArthurHollyCompton,1892—1962)。康普顿证明了，光子与电子在相互作用中不但有能量变换，还有一定的动量交换。

1923 年，德布罗意把爱因斯坦的波粒二象性推广到微观粒子，提出物质波假说，论证了微观粒子也具有波动性。他的观点不久就得到电子衍射等实验的证实。

波粒二象性是人类对物质世界的认识的又一次飞跃，这一认识为波动力学的发展奠定了基础。

§9.1　爱因斯坦的辐射理论

早在 1905 年，爱因斯坦在他提出的光量子假说中，就隐含了波动性与粒子性是光的两种表现形式的思想。他分析了从牛顿和惠更斯以来，波动说和微粒说之间的长期争论，指出麦克斯韦电磁波理论的局限性，审查了普朗克处理黑体辐射的思路，总结了光和物质相互作用有关的各种现象，认为光在传播过程和与物质相互作用的过程中，能量不是分散的，而是一份一份地以能量子的形式出现的。

1909 年 1 月，爱因斯坦再次撰文讨论辐射问题，9 月在萨尔茨堡举行的第 81 届德国物理学家和医学家会议上作了题为：《论我们关于辐射本质和组成的观点的发展》的演讲。他利用能量涨落的概念，考察一个挂在空腔中的完全反射性的镜子的运动，空腔中充有温度为 T 的热辐射。如果镜子是以一个非零的速度运动，则从它的正面反射出去的具有给定频率 v 的辐射要比从它的背面反射出去的多一些；因此镜子的运动将会受到阻尼，除非它从辐射涨落获得新的动量。爱因斯坦利用普朗克的能量分布公式，推导出体积 V 中频率在 v→v+dv，之间的那一部分黑体辐射所具有的能量均方涨落为

$$(\Delta E)^2 = V d\upsilon[h\upsilon\rho + (c^2 / 8\pi\upsilon h^2)\rho^2],$$

接着，爱因斯坦对上式两项分别作了说明。前一项正是能量子的涨落，它是以 h v 作为基数的。后一项具有从麦克斯韦理论求出的电磁场涨落的形式。前者代表粒子性，后者代表波动性。爱因斯宣称：“这些考虑……表明辐射的空间分布的涨落和辐射压的涨落也表现得好象辐射是由具有

上述大小的量子所构成的一样。”他强调指出：“现代辐射理论（按：指麦克斯韦的光的波动理论）与这个结果并不一致。”“如果（第一项）单独存在，它就会导致（所期望的）涨落，这种涨落发生在辐射是由独立运动的、具有能量 hν 的类点量子组成的情况下”。爱因斯坦用“类点量子”一词表明他已把光量子当作粒子来看待。爱因斯坦虽然还没有形成完整的辐射理论，但他已经明确到，遵循普朗克能量分布公式的辐射，同时具有粒子和波动的特性。

爱因斯坦在上述两篇论文中，对辐射理论的状况表示了如下的见解：

“我早已打算表明，必须放弃辐射理论现有的基础”；“我认为，理论物理学发展的下一阶段将给我们带来一个光的理论，这个理论可以解释为波动理论与发射理论的熔合；”“不要把波动结构和量子结构……看成是互不相容的。”爱因斯坦在这里预见到了将有一种新的理论使波动性和微粒性熔合于一体，虽然十几年后，当新的理论真正出现时，他却反而不能接受。关于这个问题，请读者参看下一章。

1916 年爱因斯坦再次回到辐射问题上来，发表了《关于辐射的量子理论》一文，这篇论文总结了量子论的成果，指出旧量子论的主要缺陷，并运用统计方法，又一次论证了辐射的量子特性。

他考虑的基本点是，分子的分立能态的稳定分布是靠分子与辐射不断进行能量交换来维持的。他假设能量交换的过程，即分子跃迁的过程有两种基本方式，一种叫自发辐射，一种叫受激辐射。根据这两种方式发生的几率，他推导出玻尔的频率定则和普朗克的能量分布公式。这样他就把前一阶段量子论的各项成果，统一在一个逻辑完备的整体之中。值得特别指出的是，爱因斯坦的受激辐射理论，为 50 年后激光的发展奠定了理论基础。

爱因斯坦在这篇论文中，认为分子与辐射在相互作用的过程中，不仅有能量转移，也同时会发生动量转移。他假设在辐射束传播的方向上，传递给分子的冲量为 $\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_n}{c}$，也就是说，他假设能量为hν的量子携带了大小为 hν/c 的动量，这一动量具有确定的方向。他这样写道[②]：“看来，只有当我们把那些基元过程看作是完全有方向的过程，我们才能够得到一个贯彻一致的理论”。“因为能量和冲量总是最紧密地联系在一起”，所以“应当把那个小的作用（指冲量交换）和辐射所引起的明显的能量转移完全同等看待。”

1921 年，德拜在一次演讲中讨论到爱因斯坦的量子辐射理论。作为一个例题，他计算了光量子和电子相互碰撞的情况，结果显示光在碰撞

[①] 转引自：A.Pais,Subtle is the Lord……,Oxford,1982,p.404.

[②] A.Einstein,phys.Zeit.18(1917)p.121，此处转引自爱因斯坦文集，第二卷，第 337 页，350 页。

后波长变长了。当时他曾建议他的同事舒勒(P.Scherrer)做一个 X 射线实验来检验波长是否真有改变。可惜舒勒没有及时做这个实验，德拜也就暂时放下这项研究。就在这段时间里，康普顿却一直在为 X 射线散射后波长变长的实验结果探求理论解释。在介绍康普顿的工作之前，还应当提到另一桩与波粒二象性有关的事件，这就是 W.H.布拉格和巴克拉(C.G.Barkla)之间发生的关于 X 射线本性的争论。

§9.2　X 射线本性之争

X 射线的波动性是 1912 年德国人劳厄用晶体衍射实验发现的。在此之前，人们对 X 射线的本性众说纷纭。伦琴倾向于 X 射线可能是以太中的某种纵波，斯托克斯认为 X 射线可能是横向的以太脉冲。由于 X 射线可以使气体分子电离，J.J.汤姆生也认为是一种脉冲波。

X 射线是波还是粒子？是纵波还是横波？最有力的判据是干涉和衍射这一类现象到底是否存在。1899 年哈加(Haga)和温德(Wind)用一个制作精良的三角形缝隙，放在 X 射线管面前，观察 X 射线在缝隙边缘是否形成衍射条纹。他们采用三角形缝隙的原因，一方面是出于无法预先知道产生衍射的条件，另一方面是因为在顶点附近便于测定像的展宽。他们从 X 射线的照片判断，如果 X 射线是波，其波长只能小于 10^{-9} 厘米。这个实验后来经瓦尔特(Walter)和泡尔(Pohl)改进，得到的照片似乎有微弱的衍射图象。直到 1912 年，有人用光度计测量这一照片的光度分布，才看到真正的衍射现象。索末菲据此计算出 X 射线的有效波长大约为 4×10^{-9} 厘米。

X 射线还有一种效应颇引人注目。当它照射到物质上时，会产生二次辐射。这一效应是 1897 年由塞格纳克(Sagnac)发现的。塞格纳克注意到，这种二次辐射是漫反射，比入射的 X 射线更容易吸收。这一发现为以后研究 X 射线的性质作了准备。1906 年巴克拉在这个基础上判定 X 射线具有偏振性。巴克拉的实验原理如图 9-1。从 X 射线管发出的 X 射线以 45°角辐照在散射物 A 上，从 A 发出的二次辐射又以 45°角投向散射物 B，再从垂直于二次辐射的各个方向观察三次辐射，发现强度有很大变化。沿着既垂直于入射射线又垂直于二次辐射的方向强度最弱。由此巴克拉得出了 X 射线具有偏振性的结论。

■图 9-1 巴克拉 X 射线二次辐射实验原理

但是偏振性还不足以判定 X 射线是波还是粒子。因为粒子也能解释这一现象，只要假设这种粒子具有旋转性就可以了。果然在 1907—8 年间一场关于 X 射线是波还是粒子的争论在巴克拉和布拉格之间展开了。布拉格根据γ射线能使原子电离，在电场和磁场中不受偏转以及穿透力极强等事实主张γ射线是由中性偶——电子和正电荷组成。后来他把 X

射线也一样看待，解释了已知的各种 X 射线现象。巴克拉则坚持 X 射线的波动性。两人各持己见，在科学期刊上展开了辩论，双方都有一些实验事实支持。这场争论虽然没有得出明确结论，但还是给科学界留下了深刻印象。

1912 年劳厄发现 X 射线衍射，对波动说提供了最有力的证据。布拉格这时已不再坚持他的中性偶假说。不过，他总是直觉地认为，就象他自己说的那样，似乎问题“不在于（微粒和波动）哪一种理论对，而是要找到一种理论，能够将这两方面包蓄并容。”[1]布拉格的思想对后来的德布罗意有一定影响。

§9.3 康普顿效应

在 1923 年 5 月的《物理评论》上，A.H.康普顿以《X 射线受轻元素散射的量子理论》为题，发表了他所发现的效应，并用光量子假说作出解释。他写道[2]：

“从量子论的观点看，可以假设：任一特殊的 X 射线量子不是被辐射器中所有电子散射，而是把它的全部能量耗于某个特殊的电子，这电子转过来又将射线向某一特殊的方向散射，这个方向与入射束成某个角度。辐射量子路径的弯折引起动量发生变化。结果，散射电子以一等于 X 射线动量变化的动量反冲。散射射线的能量等于入射射线的能量减去散射电子反冲的动能。由于散射射线应是一完整的量子，其频率也将和能量同比例地减小。因此，根据量子理论，我们可以期待散射射线的波长比入射射线大”，而“散射辐射的强度在原始 X 射线的前进方向要比反方向大，正如实验测得的那样。”

康普顿用图 9-2 解释射线方向和强度的分布，根据能量守恒和动量守恒，考虑到相对论效应，得散射波长为：

$$\lambda_\theta = \lambda_0\left(\frac{2h}{mc}\right) + \sin^2\left(\frac{1}{2}\theta\right)$$

即

$$\Delta\lambda = \lambda_\theta - \lambda_0 = \left(\frac{2h}{mc}\right)\sin^2\left(\frac{1}{2}\theta\right) \qquad (9\text{-}1)$$

$\Delta\lambda$ 为入射波长 λ_0 与散射波长 λ_θ 之差，h 为普朗克常数，c 为光速，m 为电子的静止质量，θ为散射角。

■图 9-2 康普顿理论用图

这一简单的推理对于现代物理学家来说早已成为普通常识，可是，康普顿却是得来不易的。这类现象的研究历经了一、二十年、才在 1923

[1] W.H.Bragg,Nature,90(1912)p.360

[2] A.H.Compton,Phys.Rev.,21(1923)p.483

年由康普顿得出正确结果，而康普顿自己也走了 5 年的弯路，这段历史从一个侧面说明了现代物理学产生和发展的不平坦历程。

从(9-1)式可知，波长的改变决定于θ，与λ_0无关，即对于某一角度，波长改变的绝对值是一定的。入射射线的波长越小，波长变化的相对值就越大。所以，康普顿效应对γ射线要比 X 射线显著。历史正是这样，早在 1904 年，英国物理学家伊夫(A.S.Eve)就在研究γ射线的吸收和散射性质时，首先发现了康普顿效应的迹象。他的装置如图 9-3。图中辐射物和吸收物实际上是铁板铝板之类的材料，镭管发出γ射线，经散射物散射后投向静电计。在入射射线或散射射线的途中插一吸收物以检验其穿透力。伊夫发现，散射后的射线往往比入射射线要“软”些。后来，γ射线的散射问题经过多人研究，英国的弗罗兰斯(D.C.H.Florance)在 1910 年获得了明确结论，证明散射后的二次射线决定于散射角度，与散射物的材料无关，而且散射角越大，吸收系数也越大。所谓射线变软，实际上就是射线的波长变长，当时尚未判明γ射线的本质，只好根据实验现象来表示。

■图 9-3 伊夫(1904 年)的装置

1913 年，麦克基尔大学的格雷（J.A.Gray）又重做γ射线实验，证实了弗罗兰斯的结论并进一步精确测量了射线强度。他发现：“单色的γ射线被散射后，性质会有所变化。散射角越大，散射射线就越软。”

实验事实明确地摆在物理学家面前，可就是找不到正确的解释。

1919 年康普顿也接触到γ散射问题。他以精确的手段测定了γ射线的波长，确定了散射后波长变长的事实。后来，他又从γ射线散射转移到 X 射线散射。图 9-4 是康普顿自制的 X 射线分光计，钼的 K_α线经石墨晶体散射后，用游离室进行测量不同方位的散射强度。图 9-5 是康谱顿发表的部分曲线。从图中可以看出，X 射线散射曲线明显地有两个峰值，其中一个波长等于原始射线的波长（不变线），另一个波长变长（变线），变线对不变线的偏离随散射角变化，散射角越大，偏离也越大。

■图 9-4 康普顿的 X 射线分光计

遗憾的是，康普顿为了解释这一现象，也和其他人一样，走了不少弯路。

他开始是用 J.J.汤姆生的电子散射理论解释γ射线和 X 射线的散射，后来又提出荧光辐射理论和大电子模型。他设想电子具有一定的大小和形状，认为只要“电子的电荷分布区域的半径与γ射线的波长大小可比拟”就可以“在经典电动力学的基础上解释高频辐射的散射。”他为了解释荧光辐射的频率变低，曾试图用多普勒效应进行计算，在计算

---

① A.S.Eve,Phil.Mag.8(1904)p.669.

② J.A.Gray,Phil.Mag.,26(1913)p.611.

中，他把 X 射线对散射物质中电子的作用看成是一个量子过程。开始他用能量$h\nu = \frac{1}{2}m\upsilon^2$进行计算，结果与实际不符。后来，他终于采用了两个条件，在碰撞中既要遵守能量守恒，又要遵守动量守恒，从而，导致了 1923 年 5 月在《物理评论》上发表了那篇有历史意义的文献。

■图 9-5 康普顿发表的部分曲线

接着，德拜也发表了早已准备好的论文。他们两人的论文引起了强烈反响。然而，这一发现并没有立即被科学界普遍承认，一场激烈的争论迅即在康普顿和他的领导人之间展开。这件事发生在 1922 年以后，一份内有康普顿关于 X 射线散射的报告在交付出版之前，先要经美国研究委员会的物理科学部所属的一个委员会讨论。他是这个委员会的成员。可是，这个委员会的主席杜安(W.Duane)却极力反对把康普顿的工作写进去，认为实验结果不可靠。因为杜安的实验室也在做同样的实验，却得不到同样的结果。

康普顿的学生，从中国赴美留学的吴有训对康普顿效应的进一步研究和检验有很大贡献，除了针对杜安的否定作了许多有说服力的实验外，还证实了康普顿效应的普遍性。他测试了多种元素对 X 射线的散射曲线，结果都满足康普顿的量子散射公式(9-1)。图 9-6 就是康普顿和吴有训 1924 年发表的曲线，论文题目是：《被轻元素散射时钼 K_α线的波长》。[①]他们写道：“这张图的重要点在于：从各种材料所得之谱在性质上几乎完全一致。每种情况，不变线 P 都出现在与荧光 M_0K_α线（钼的 K_α谱线）相同之处，而变线的峰值，则在允许的实验误差范围内，出现在上述的波长变化量子公式所预计的位置 M 上。”

■图 9-5 康普顿发表的部分曲线

■图 9-6 康普顿和吴有训 1924 年发表的曲线

吴有训对康普顿效应最突出的贡献在于测定了 x 射线散射中变线、不变线的强度比率 R 随散射物原子序数变化的曲线，证实并发展了康普顿的量子散射理论。

爱因斯坦在肯定康普顿效应中起了特别重要的作用。前面已经提到，1916 年爱因斯坦进一步发展了光量子理论。根据他的建议，玻特和盖革(Geiger)也曾试图用实验检验经典理论和光量子理论谁对谁非，但没有成功。当 1923 年爱因斯坦获知康普顿实验的结果之后，他热忱地宣传和赞扬康普顿的实验，多次在会议和报刊上谈到它的重要意义。

爱因斯坦还提醒物理学者注意：不要仅仅看到光的粒子性，康普顿在实验中正是依靠了 X 射线的波动性测量其波长。他在 1924 年 4 月 20 日的《柏林日报》副刊上发表题为《康普顿实验》的短文，有这样一句话：“……最最重要的问题，是要考虑把投射体的性质赋予光的粒子或

---

① A.H.ComptonandY.H.Woo,Proc.Nat.Acad.Sei,10(1924)p.27.

光量子，究竟还应当走多远。”正是由于爱因斯坦等人的努力，光的波粒二象性迅速获得了广泛的承认。

§9.4 德布罗意假说

作为量子力学的前奏，路易斯·德布罗意的物质波理论有着特殊的重要性。

德布罗意是法国物理学家，原来学的是历史，对科学也很有兴趣。第一次世界大战期间，在军队服役，从事无线电工作。平时爱读科学著作，特别是彭加勒、洛仑兹和朗之万的著作。后来对普朗克、爱因斯坦和玻尔的工作发生了兴趣，乃转而研究物理学。退伍后跟随朗之万攻读物理学博士学位。他的兄长莫里斯·德布罗意是一位研究 X 射线的专家，路易斯曾随莫里斯一道研究 X 射线，两人经常讨论有关的理论问题。莫里斯曾在 1911 年第一届索尔威会议上担任秘书，负责整理文件。这次会议的主题是关于辐射和量子论。会议文件对路易斯有很大启发。莫里斯和另一位 X 射线专家 W.布拉格联系密切。布拉格曾主张过 X 射线的粒子性。这个观点对莫里斯很有影响，所以他经常跟弟弟讨论波和粒子的关系。这些条件促使德布罗意深入思考波粒二象性的问题。

法国物理学家布里渊(M.Brillouin)在 1919—1922 年间发表过一系列论文，提出了一种能解释玻尔定态轨道原子模型的理论。他设想原子核周围的“以太”会因电子的运动激发一种波，这种波互相干涉，只有在电子轨道半径适当时才能形成环绕原子核的驻波，因而轨道半径是量子化的。这一见解被德布罗意吸收了，他把以太的概念去掉，把以太的波动性直接赋予电子本身，对原子理论进行深入探讨。

1923 年 9 月—10 月间，德布罗意连续在《法国科学院通报》上发表了三篇有关波和量子的论文。第一篇题目是《辐射——波与量子》，提出实物粒子也有波粒二象性，认为与运动粒子相应的还有一正弦波，两者总保持相同的位相。后来他把这种假想的非物质波称为相波。他考虑一个静质量为 m_0 的运动粒子的相对论效应，把相应的内在能量 m_0c^2 视为一种频率为 ν_0 的简单周期性现象。他把相波概念应用到以闭合轨道绕核运动的电子，推出了玻尔量子化条件。在第三篇题为《量子气体运动理论以及费马原理》的论文中，他进一步提出，“只有满足位相波谐振，才是稳定的轨道。”在第二年的博士论文中，他更明确地写下了：“谐振条件是 $l=n\lambda$，即电子轨道的周长是位相波波长的整数倍。”

在第二篇题为《光学——光量子、衍射和干涉》的论文中，德布罗意提出如下设想：“在一定情形中，任一运动质点能够被衍射。穿过一

---

① R.S.Shankland(ed.),Scientific Papers of A.H.Compton,Univ.of ChicagoPress,(1973)

个相当小的开孔的电子群会表现出衍射现象。正是在这一方面，有可能寻得我们观点的实验验证。”在这里要说明两点：第一点，德布罗意并没有明确提出物质波这一概念，他只是用位相波或相波的概念，认为这是一种假想的非物质波。可是究竟是一种什么波呢？在他的博士论文结尾处，他特别声明：“我特意将相波和周期现象说得比较含糊，就象光量子的定义一样，可以说只是一种解释，因此最好将这一理论看成是物理内容尚未说清楚的一种表达方式，而不能看成是最后定论的学说。”物质波是在薛定谔方程建立以后，在诠释波函数的物理意义时才由薛定谔提出的。第二点，德布罗意并没有明确提出波长λ和动量 p 之间的关系式：λ=h/P(h 即 Planck 常数)，只是后来人们发觉这一关系在他的论文中已经隐含了，就把这一关系称为德布罗意公式。

德布罗意的博士论文得到了答辩委员会的高度评价，认为很有独创精神，但是人们总认为他的想法过于玄妙，没有认真地加以对待。例如：在答辩会上，有人提问有什么可以验证这一新的观念。德布罗意答道：“通过电子在晶体上的衍射实验，应当有可能观察到这种假定的波动的效应。”在他兄长的实验室中有一位实验物理学家道威利尔（Dauvillier）曾试图用阴极射线管做这样的实验，试了一试，没有成功，就放弃了。后来分析，可能是电子的速度不够大，当作靶子的云母晶体吸收了空中游离的电荷，如果实验者认真做下去，肯定会做出结果来的。

德布罗意的论文发表后，当时并没有多大反应。后来引起人们注意是由于爱因斯坦的支持。朗之万曾将德布罗意的论文寄了一份给爱因斯坦，爱因斯坦看到后非常高兴。他没有想到，自己创立的有关光的波粒二象性观念，在德布罗意手里发展成如此丰富的内容，竟扩展到了运动粒子。当时爱因斯坦正在撰写有关量子统计的论文，于是就在其中加了一段介绍德布罗意工作的内容。他写道：“一个物质粒子或物质粒子系可以怎样用一个波场相对应，德布罗意先生已在一篇很值得注意的论文中指出了。”这样一来，德布罗意的工作立即获得大家注意。

§9.5 物质波理论的实验验证

上一节讲到，德布罗意曾设想，晶体对电子束的衍射实验，有可能观察到电子束的波动性。人们希望能够实现这一预见。耐人寻味的是，正在这个时候，有两个令人迷惑不解的实验结果也在等待理论上作出正确的解释。这两个实验就是下面要讲到的冉绍尔(C.W.Ramsauer)的电子-

---

① L.d.Broglie,Comptes Rend.177(1923)p.548

① 范岱年等编译，爱因斯坦文集，第二集(1977)P.421

原子碰撞实验和戴维森(C.J.Davisson)的电子散射实验。

1913年，德国物理学家冉绍尔发展了一种研究电子运动的实验方法，人称冉绍尔圆环法。用这种方法可以高度精确地确定慢电子的速度和能量。粒子间相互碰撞的有效截面概念就是冉绍尔首先提出来的。第一次世界大战后，冉绍尔继续用他的圆环法进行慢速电子与各种气体原子弹性碰撞的实验研究。1920年，他在题为：《气体分子对慢电子的截面》一文中报道了他发现氩气有特殊行为。

实验装置如图9-7所示。

冉绍尔在腔室中分别充以各种不同的气体，例如氢、氦、氮和氩。他经过多次测量，发现一般气体的截面"随电子速度减小均趋于常值，唯独氩的截面变得特别小"。由氩的这一反常行为，冉绍尔得出的结论是："在这个现象中人们观察到最慢的电子对氩原子是自由渗透的。"

图9-8是冉绍尔综合多人实验结果而作出的惰性气体Xe、Kr、Ar对电子的散射截面随电子速度变化的曲线，图中横坐标是与电子速度成正比的加速电压平方根值，纵坐标是散射截面Q，用原子单位，其中α_0为玻尔原子半径。三种惰性气体的曲线具有大体相同的形状。约在电子能量为10eV时，Q达极大值，而后开始下降；当电子能量逐渐减小到1eV左右时，Q又出现极小值；能量再减小，Q值再度上升。事实确凿地证明，低能电子与原子的弹性碰撞是无法用经典理论解释的。

■图9-7 冉绍尔圆环法

■9-8 冉绍尔的实验结果

这就是当年令人不解的冉绍尔效应。

戴维森的电子散射实验比冉绍尔的电子碰撞实验更早得到奇特的结果。戴维森是美国西部电气公司工程部（即后来的贝尔电话实验室）的研究员，从事热电子发射和二次电子发射的研究。1921年，他和助手孔斯曼(Kunsman)在用电子束轰击镍靶时，发现从镍靶反射回来的二次电子有奇异的角度分布，其分布曲线如图9-9，出现了两个极大值。戴维森没有放过这一现象，反复试验，并撰文在1921年的《科学》(Science)杂志上进行了讨论[①]。他当时的看法是认为极大值的出现可能是电子壳层的象征，这一研究也许可以找到探测原子结构的又一途径。

■图9-9 戴维森(1921年)发表的电子散射曲线

这件事引起了德国著名物理学家玻恩(M.Born)的注意，他让一名叫洪德(F.Hund，后来是著名光谱学家)的研究生，根据戴维森的电子壳层假设重新计算电子散射曲线的极大极小值。在一次讨论班上洪德作了汇报，引起另一名研究生埃尔萨塞(W.Elsasser)的兴趣。埃尔萨塞的思想

[①] 转引自：J.Mehra and H.Rechenberg,The Historical Development of Quantum Theory, Vol.1,Part2,p.621.

[①] C.Davisson,C.H.Kunsman,Science,54(1921)p.524.

特别活跃，非常关心物理学各个领域的新进展，当他得知爱因斯坦和玻色（Bose）新近发表了量子统计理论，就想找到爱因斯坦的文章来阅读。爱因斯坦在文章中特别提到了德布罗意的物质波假说，使埃尔萨塞获得很大启发。不久，埃尔萨塞又读到了德布罗意给玻恩寄存来的论文。他的思想突然产生了一个飞跃，会不会戴维森和孔斯曼的极大极小值，就是电子波动性造成的？

他迅即按德布罗意公式用计算尺估算了最大值所需的电子能量，发现数量级正确。几个星期之后，他写了一篇通讯给德文《自然科学》杂志，题为《关于自由电子的量子力学的说明》[①]。在这篇短文中，他特别提到用波动性的假说不但可以解释戴维森和孔斯曼的实验，还可以解释冉绍尔效应，在文章最后，他申明要取得定量验证，有待于他自己正在准备的进一步实验。他花了三个月的时间考虑实验方案，终因技术力量不足而放弃。

戴维森从 1921 年起就没有间断电子散射实验，一直在研究电子轰击镍靶时出现的反常行为。他仍沿着电子壳层的方向进行研究，没有注意埃尔萨塞的论文。1925 年，一次偶然的事故使他的工作获得了戏剧性的进展。有一天，他的助手革末(Germer)正准备给实验用的管子加热去气，真空系统的炭阱瓶突然破裂了，空气冲进了真空系统，镍靶严重氧化。过去也曾发生过类似事故，整个管子往往报废，这次戴维森决定采取修复的办法，在真空和氢气中加热，给阴极去气。经过两个月的折腾，又重新开始了正式试验。在这中间，奇迹出现了。1925 年 5 月初，结果还和 1921 年所得差不多，可是 5 月中曲线发生特殊变化，出现了好几处尖锐的峰值，如图 9-10 所示。他们立即采取措施，将管子切开看看里面发生了什么变化。经公司一位显微镜专家的帮助，发现镍靶在修复的过程中发生了变化，原来磨得极光的镍表面，现在看来构成了一排大约十块明显的结晶面。他们断定散射曲线反常的原因就在于原子重新排列成晶体阵列。

■图 9-10 偶然事件(1925 年)前后的对比

这一结论促使戴维森和革末修改他们的实验计划。既然小的晶面排列很乱，无法进行系统的研究，他们就作了一块大的单晶镍，并切取一特定方向来做实验。他们事前并不熟悉这方面的工作，所以前后花了近一年的时间，才准备好新的镍靶和管子。有趣的是，他们为熟悉晶体结构做了很多 X 射线衍射实验，拍摄了很多 X 射线衍射照片，可就是没有将 X 射线衍射和他们正从事的电子衍射联系起来。他们设计了很精巧的实验装置，镍靶可沿入射束的轴线转 360°，电子散射后的收集器也可以取不同角度，显然他们的目标已从探索原子结构，转向探索晶体结构。

[①] W.Elsasser,Naturwissenschaften,13(1925)p.711.

1926 年继续做电子散射实验，然而结果并不理想，总得不到偶然事件之后的那种曲线。

这时正值英国科学促进会在牛津开会。戴维森参加了会议。在 1926 年 8 月 10 日的会议上，他听到了著名的德国物理学家玻恩讲到，“ 截维森和康斯曼……从金属表面反射的实验 ” 是德布罗意波动理论所预言的电子衍射的 “ 证据 ”。戴维森没有想到自己三年前的实验竟有这样重要的意义。

会议之后，戴维森找到玻恩和其他一些著名的物理学家，让他们看新近得到的单晶散射曲线，跟他们进行了热烈的讨论。玻恩建议戴维森仔细研究薛定谔有关波动力学的论文。这次讨论对戴维森的工作有决定性的影响。回到纽约后，他重新制定了研究方案。有了明确的探索目标，工作进展相当迅速。这时，戴维森已经自觉接受波动理论的指导，有效地发挥自己的技术专长。戴维森和革末的实验装置极其精巧，整套装置仅长 5 英寸，高 2 英寸，密封在玻璃泡里，经反复烘烤与去气，真空度达 10^{-8} 托，即 10^{-6} 帕。散射电子用一双层的法拉第筒（叫电子收集器）收集，送到电流计测量。收集器内外两层之间用石英绝缘，加有反向电压，以阻止经过非弹性碰撞的电子进入收集器，收集器可沿轨道转动，如图 9-11 和图 9-12。

■图 9-11 戴维森实验装置原理图

■图 9-12 戴维森实验装置结构图

仔细备制的样品是从晶体生产的单晶镍切割下来，经过研磨、腐蚀，取(111)面正对电子束，这是由于镍是面心型晶体，(111)面是这类晶体点阵最为密集的方向。晶体安装在沿入射束方向的轴上，可以随意改变方位。

散射电流取决于四个因素：轰击电流、方位、散射角和轰击电压。已知散射电流与轰击电流之间有简单的正比关系，实验主要考察散射电流跟后面三项的关系。他们做了大量的测试工作。

他们综合几十组曲线，肯定这是电子束打到镍晶体发生的衍射现象。于是，他们进一步做定量比较。然而，不同加速电压下，电子束的最大值所在的散射角，总与德布罗意公式计算的结果相差一些。他们发现，如果理论值乘 0.7，与电子衍射角基本相符。

他们的论文发表在《自然》杂志 1927 年 4 月 16 日的一期上[①]。这篇论文立即引起了人们的注意。不久依卡尔特(Eckart)指出[②]。理论和实验之间的偏差可能是由于电子在晶体中受到折射。戴维森继续实验，发现随着轰击电压增加，偏差越来越小。图 9—13 是戴维森和革末在 1928 年

---

① C.DavissonandL.H.Germer,Nature,119(1927)p.558.

② Eckart, Proc.Nat.Acad.Sci.13(1927),p.160.

4 月发表的曲线，表明电子束反射后的强度随波长改变的关系。箭头所指代表各级衍射的理论值。由图可见，随着波长变短，也即加速电压增大，偏差越来越小。根据戴维森的数据，贝特(W.Bethe)推算出金属表面存在内电势，对于镍，内电势约为 15 伏。如果考虑这一因素，理论值和实验值就吻合一致了。至此，戴维森完全证实了电子衍射的存在，为德布罗意的物质波假说提供了重要证据。

如果说戴维森发现电子衍射走的是一条曲折的道路，那末，G.P.汤姆生就是走了一条直路。他是电子的发现者 J．J．汤姆生的独生子，从小接受到良好的科学教育，在父亲的指导下做气体放电等方面的研究工作。1922 年，30 岁的 G．P.汤姆生当了阿伯登(Aberdeen)大学教授，继续做他父亲一直从事的正射线的研究，实验设备主要是电子枪和真空系统。他很欣赏 1924 年德布罗意的论文，并于 1925 年向《哲学杂志》投过一篇论文，试图参加有关物质波的讨论。1926 年在牛津召开的英国科学促进会他也参加了，不过当时没有见到戴维森。是玻恩的报告引起他对德布罗意物质波假说的进一步兴趣，促使他按照埃尔萨塞的方案去探讨电子波存在的可能性。他的实验室有优越的条件可以进行电子散射实验。果然当他把正射线的散射实验装置作些改造，把感应圈的极性反接，在电子束所经途中加一赛璐珞薄膜作为靶子，让电子束射向感光底片，不久就得到了边缘模糊的晕环照片。这就是最早的电子衍射花纹。

■图 9-13　戴维森（1928 年）发表的曲线

G.P.汤姆生的电子衍射实验原理如图 9-14。它的特点是：电子束经高达上万伏的电压加速，能量相当于 10—40keV，电子有可能穿透固体薄箔，直接产生衍射花纹，不必象戴维森的低能电子衍射实验那样，要靠反射的方法逐点进行观测，而且衍射物质也不必用单晶材料，可以用多晶体代替。因为多晶体是由大量随机取向的微小晶体组成，沿各种方向的平面都有可能满足布拉格条件，所以可以从各个方向同时观察到衍射，衍射花纹必将组成一个个同心圆环，和 X 射线德拜粉末法所得衍射图形类似。

■图 9-14G.P.汤姆生的实验原理图

1937 年，G.P.汤姆生和戴维森一起，由于电子衍射方面的工作共获诺贝尔物理奖。物质波理论不仅得到电子束实验的证实，还可以从分子束甚至中子束获得验证。

1930 年,分子束方法的创始人斯特恩(O.Stern)和他的合作者用氢分子和氦原子证实普通原子和分子也具有波动性，成功的关键是他们做成了极其灵敏的气压计，可用于检测分子束。原子和分子是中性的，无法用电场加速，只能从平衡态的热分布中选择某一范围速度内的部分粒子，所以能量非常低，一般只有百分之几电子伏特，相当于波长为 1Å。

实验原理如图 9–15。氦原子束或氢分子束经准直缝投向氟化锂(LiF)

单晶，散射后被检测器（即气压计）接收。检测器可以绕轴旋转测不同方位的粒子数。当方位角ψ=0 时，反射束与入射束处于同一平面，强度最大；改变ψ角，强度锐减；当ψ=11°时，出现第一衍射峰，曲线如图9–16。

■图 9–15 斯特恩的分子束实验

■图 9–16 分子束衍射的强度分布

1931—1933 年，斯特恩等人在分子束所经的途中加了一道速度选择器，实验结果大为改善。速度选择器是由两只同轴齿轮组成，轮上沿辐向各刻有 400 多个轮齿，如图 9–17。齿轮的转速可以调节，不同的转速选择不同速度的分子（实际上是速度间隔为 V→v+△v 的分子）自由地穿过轮齿，到达 LiF 晶体。用这个方法，斯特恩证明氦原子束经 LiF 晶体衍射所得结果与德布罗意关系一致，实验误差不超过 1—2%。

这项精采实验有很深远的意义。自由电子具有波动性可能还比较容易被人们接受，因为电子本身就是一种难以捉摸的微观粒子，波动性也许就是它的某种特性。当证明氢分子和氦原子一类的中性物质同样也具有波动性时，就不能不使人们确信波粒二象性是物质的普遍属性了。

另一项值得提到的是核粒子的波动性，其中尤以中子衍射的研究最有价值。中子是 1932 年发现的，1936 年就有人观测到中子的衍射现象。不过那时中子束是从最原始的中子源即镭铍源获得的。

40 年代以后，各种反应堆发展起来了，有可能获得较强的中子束。这时，中子衍射不但又一次提供了物质波的实验证据，而且被利用于探测物质结构，成了材料科学中的一门重要实验技术。

■图 9–17 斯特恩在分子束实验装置中加速度选择器

第十章　量子力学的建立与发展

§10.1　历史概述

玻尔的量子理论尽管取得了不少令人惊奇的成果，但也遇到严重困难。困难之一是它面临着一系列解决不了的问题，例如：它无法解释氦原子光谱，也无法对诸如反常塞曼效应一类新现象作出令人满意的说明；困难之二是内在的不协调。例如：对应原理的应用往往因人因事而异，没有统一规则。有人曾这样形容当时物理学界的处境：星期一三五用辐射的经典理论；而在星期二四六则应用辐射的量子理论。这确实反映了当时物理学的混乱情况，需要重新认识电子的行为，建立新的概念，对玻尔理论作进一步的改造。

1924 年泡利(W.Pauli)提出不相容原理。这个原理促使乌伦贝克(G.E.Uhlenbeck)和高斯密特(S.A.Goudsmit)在 1925 年提出电子自旋的假设。从而使长期得不到解释的光谱精细结构、反常塞曼效应和斯特恩–盖拉赫实验等难题迎刃而解。正好在这个时候，海森伯创立了矩阵力学，使量子理论登上了一个新的台阶。

1923 年德布罗意提出物质波假设,导致了薛定谔在 1926 年以波动方程的形式建立新的量子理论。不久薛定谔证明，这两种量子理论是完全等价的，只不过形式不同罢了。

1928 年狄拉克提出电子的相对论性运动方程——狄拉克方程，奠定了相对论性量子力学的基础。他把量子论与相对论结合在一起，很自然地解释了电子自旋和电子磁矩的存在，并预言了正负电子对的湮没与产生。

1933 年狄拉克还提出量子力学的第三种表述方式，这就是后来由费因曼发展的路径积分量子化形式。费因曼用这种量子理论研究电子和光子的相互作用，为量子电动力学的发展打开了新局面。

量子论和相对论是现代物理学的两大基石。如果说相对论给我们提供了新的时空观，就可以说量子论给我们提供了新的关于自然界的表述方法和思考方法。量子力学揭示了微观物质世界的基本规律，为原子物理学、固体物理学、核物理学和粒子物理学奠定了理论基础。

§10.2　电子自旋概念的提出

玻尔理论提出之后，最令人头疼的事情莫过于反常塞曼效应的规律无法解释。1921 年，杜宾根大学的朗德(A.Landé)认为，根据反常塞曼效应的实验结果看来，描述电子状态的磁量子数 m 应该不是 $m=l$，$l-1$，

$l-2$，$\cdots -l$（共$2l+1$个），而应该是$m=l-\frac{1}{2}$，$l-\frac{3}{2}$，$\cdots\left(l-\frac{1}{2}\right)$，（共 2l 个）。为了解释半量子数的存在，理论家费尽了心机，提出了种种假说。

1924 年，泡利通过计算发现，满壳层的原子实应该具有零角动量，因此他断定反常塞曼效应的谱线分裂只是由价电子引起，而与原子实无关。显然价电子的量子论性质具有“二重性”。他写道：[①]

“在一个原子中，决不能有两个或两个以上的同科电子，对它们来说，在外场中它们的所有量子数 n、k_1、k_2、m（或 n、k_1、m_1、m_2）都是相等的。如果在原子中出现一个电子，它们的这些量子数（在外场中）都具有确定的数值，那么这个态就说是已被占据了。”

这就是著名的不相容原理。泡利提出电子性质有二重性实际上就是赋予电子以第四个自由度。电子自旋再加上不相容原理，已经能够比较满意地解释元素周期表了。所以泡利的思想得到了大多数物理学家的赞许。然而二重性和第四个自由度的物理意义究竟是什么，连泡利自己也说不清楚。

这时有一位来自美国的物理学家克罗尼格(R.L.Kronig)，对泡利的思想非常感兴趣。他从模型的角度考虑，认为可以把电子的第四个自由度看成是电子具有固有角动量，电子围绕自己的轴在作自转。根据这个模型，他还作了一番计算，得到的结果竟和用相对论推证所得相符。于是他急切地找泡利讨论，那里想到，克罗尼格的自转模型竟遭到泡利的强烈反对。泡利对克罗尼格说：“你的想法的确很聪明，但是大自然并不喜欢它。”泡利不相信电子会有本征角动量。他早就考虑过绕轴自旋的电子模型，由于电子的表面速度有可能超过光速，违背了相对论，所以必须放弃。更根本的原因是泡利不希望在量子理论中保留任何经典概念。克罗尼格见泡利这样强烈的态度，也就不敢把自己的想法写成论文发表。

半年后，荷兰著名物理学家埃伦费斯特的两个学生，一个叫乌伦贝克，一个叫高斯密特，在不知道克罗尼格工作的情况下提出了同样的想法。他们找埃伦费斯特讨论，埃伦费斯特认为他们的想法非常重要，当然也可能完全错了，建议他们写成论文拿去发表。于是，他们写了一篇只有一页的短文请埃伦费斯特推荐给《自然》杂志。接着他们两人又去找物理学界老前辈洛仑兹请教。洛仑兹热诚地接待了他们，答应想一想再回答。一周后再见到洛仑兹时，洛仑兹给他们一叠稿纸，稿纸上写满了计算式子和数字。并且告诉他们，如果电子围绕自身轴旋转，其表面速度将达到光速的十倍。这个结果当然是荒唐的，于是他们马上回去请

[①] W.Pauli,Zeit.Phys.31（1925）p.765.

埃伦费斯特还给他们那篇论文，承认自己是在胡闹。可是出乎他们意料，埃伦费斯特早已把论文寄走了，大概马上就要发表。乌伦贝克和高斯密特感到非常懊丧，埃伦费斯特劝他们说：“你们还很年轻，做点蠢事不要紧。”

乌伦贝克和高斯密特的论文刊出后，海森伯立刻来信表示赞许，并认为可以利用自旋–轨道耦合作用，解决泡利理论中所谓“二重性”的困难。不过，棘手的问题是如何解释双线公式中多出的因子 2。对于这个问题，乌伦贝克和高斯密特一时无法回答。

幸好这时爱因斯坦来到了莱顿大学进行访问讲学。爱因斯坦向他们提供了关键性的启示：在相对于电子静止的坐标系里，运动原子核的电场将按照相对论的变换公式产生磁场，再利用一级微扰理论可以算出两种不同自旋方向的能量差。

玻尔也很赞赏乌伦贝克和高斯密特的工作，他真没想到困扰多年的光谱精细结构问题，居然能用“自旋”这一简单的力学概念就可以解决。不过他也感到棘手，因为从相对论推出的双线公式还没有能对因子 2 作出完全解释。

泡利则始终反对运用力学模型来进行思考。他对玻尔争辨说：“一种新的邪说将被引入物理学。”他有自己独特的见解。

1926 年，因子 2 的困难终于被在哥本哈根研究所工作的英国物理学家托马斯(L.H.Thomas)解决了。他运用相对论的规律进行计算，发现人们的错误在于忽略了坐标系变换时的相对论效应，只要考虑到电子具有加速度，加上这一相对论效应就可以自然地得到因子 2。

这样一来，物理学界很快就普遍接受了电子自旋的概念。连泡利也承认这一假设是有效的。他给玻尔写信说：“现在对我来说，只好完全投降了。”

应该说，泡利并没有错。他在两年后也实现了自己的目标，把电子自旋纳入了量子力学的体系。不久狄拉克建立相对论性量子力学，在他的理论中可以自然地得出电子具有内禀角动量这个重要结论。

§10.3 矩阵力学的创立

矩阵力学的创立者海森伯原是索末菲的学生。1922 年 6 月玻尔应邀到哥廷根讲学，索末菲带领海森伯和泡利一起去听讲。在讲演后的讨论中，海森伯发表的意见引起玻尔的注意，尔后两人一起散步继续讨论。玻尔对这位年轻的学者印象深刻，邀请他和泡利在适当的时候到哥本哈根去作研究。1922 年海森伯就去了，开始了他们之间的长期合作。1924 年海森伯又到哥本哈根跟玻尔和克拉末斯(H.A.Kramers)合作研究光的色散理论。

在研究中，海森伯认识到，不仅描写电子运动的偶极振幅的傅里叶分量的绝对值平方决定相应辐射的强度，而且振幅本身的位相也是有观察意义的。海森伯由这里出发，假设电子运动的偶极和多极电矩辐射的经典公式在量子理论中仍然有效。然后运用玻尔的对应原理，用定态能量差决定的跃迁频率来改写经典理论中电矩的傅里叶展开式。谱线频率和谱线强度的振幅都是可观察量。这样，海森伯就不再需要电子轨道等经典概念，代之以频率和振幅的二维数集。

但是令海森伯奇怪的是，这样做的结果，计算中的乘法却是不可对易的。当时他还不知道这就是矩阵运算，于是他把论文拿给著名物理学家玻恩，请教有没有发表价值。玻恩开始也感到茫然，经过几天的思索，记起了这正是大学学过的矩阵运算，认出海森伯用来表示观察量的二维数集正是线性代数中的矩阵。从此以后，海森伯的新理论就叫《矩阵力学》。

玻恩认识到海森伯的工作有重要意义，立即推荐发表，并着手运用矩阵方法为新理论建立一套严密的数学基础。一次偶然的机会，玻恩遇见了年轻的数学家约丹(P.Jordon)，约丹正是这方面的内行，欣然应允合作。1925 年 9 月，两人联名发表了《论量子力学》一文，首次给矩阵力学以严格表述。

接着，玻恩、约丹和海森伯三人合作，又写了一篇论文，把以前的结果推广到多自由度和有简并的情况，系统地论述了本征值问题、定态微扰和含时间的定态微扰，导出了动量和角动量守恒定律，以及强度公式和选择定则，还讨论了塞曼效应等问题，从而奠定了量子力学的基础。

§10.4　波动力学的创立

在海森伯、玻恩和约丹创立矩阵力学的同时，薛定谔从另一途径创建了波动力学。

薛定谔是奥地利人，1906—1910 年在维也纳大学物理系学习，1910 年获得博士学位后留在维也纳大学从事实验物理学研究。第一次世界大战期间，服役于一个偏僻的炮兵要塞，利用闲暇研究理论物理，1921 年受聘任瑞士苏黎世大学任数学物理教授，主要研究热力学和统计力学，1925 年夏秋之际，从事量子气体理论研究。这时正值爱因斯坦和玻色关于量子统计理论的著作发表不久，爱因斯坦在论文中提到了德布罗意的物质波假说。在他的启示下，薛定谔萌发了用新观点研究原子结构的想法。可以说，爱因斯坦是薛定谔的直接引路人，正是由于爱因斯坦那篇关于单原子理想气体量子理论的论文，引导了薛定谔的研究方向。1925 年 10 月，薛定谔得到了一份德布罗意的博士论文，使他有可能深入地研究德布罗意的位相波思想。薛定谔在他的第一篇论文中，提到了德布罗

意的博士论文对他的启示。他写道：“我要特别感谢路易斯·德布罗意先生的精湛论文，是它激起了我的这些思考和对‘相波’在空间中的分布加以思索。”著名化学物理学家德拜对他也有积极影响。据说，在苏黎世定期召开的讨论会上，薛定谔被德拜指定作有关德布罗意工作的报告。在报告之后，主持人德拜表示不满，向他指出，研究波动就应该先建立波动方程。薛定谔在他的启示下，下功夫研究这个问题，几星期后，薛定谔再次报告，宣布找到了这个方程[①]。

这个有关薛定谔创建波动力学的故事，流传甚广，德拜本人也表示确有此事。但应该指出，这件事情即使发生过，对薛定谔的工作也不会起决定性的影响[②]。

1926 年 1—6 月间，薛定谔一连发表了四篇论文，题目都是《量子化就是本征值问题》，对他的新理论作了系统论述。薛定谔是从经典力学和几何光学的对比，提出了对应于波动光学的波动方程。开始，他试图建立一个相对论性运动方程，但由于当时还不知道电子有自旋，所以在关于氢原子光谱的精细结构的理论上与实验数据不符。后来他改用非相对论性波动方程来处理电子，得到了与实验相符的结果，这个波动方程现在就叫薛定谔方程。他在第一篇论文中引入波函数ψ的概念，利用变分原理，得到不含时间的氢原子波动方程：

$$\nabla^2\psi+\frac{2m}{K^2}\left(E+\frac{e^2}{r}\right)\psi=0，$$

或

$$\nabla^2\psi+\frac{8\pi^2m}{h^2}\left(E+\frac{e^2}{r}\right)\psi=0，$$

其中 h＝2πK。

薛定谔从这个方程得到的解正是氢原子的能级公式。这样，量子化就成了薛定谔方程的自然结果，而不是象玻尔和索末菲那样需要人为规定某些量子化条件。

薛定谔在论文一开始就写道：“通常的量子化法则可以用另一个假设来代替了，在这个假设中，不引入任何一个关于‘整数’的概念，而整数性倒会象振动的弦的波节数是整数一样很自然地得出来。这种新的理解是可以普遍化的，而且象我认为的那样，是很深地渊源于量子法则的真正本质之中的[①]。

在第二篇论文中，薛定谔从经典力学与几何光学的类比及物理光学到几何光学过渡的角度，阐述了他建立波动力学的思想，并建立了一般

[①] Bloch, Phys.Tod.,28（1975-Dec.）p.293.

[②] V.V.Raman,P.Forman,HSPS,vol.1（1969）p.293.

[①] S.Schrodinger,Ann.d.Phys.,4（1926）.

的含时间的波动方程。

接着，薛定谔解出了谐振子的能级和定态波函数，结果与海森伯的矩阵力学所得相同。他还处理了普朗克谐振子和双原子分子等问题。

薛定谔的第三篇论文阐述了定态微扰理论，他用波函数详细计算了氢原子的斯塔克效应，结果与实验符合得很好。

薛定谔的第四篇论文推出了含时间的微扰理论，并用之于计算色散等问题。

这一组论文奠定了非相对论量子力学的基础。薛定谔把自己的新理论称为波动力学。

总括起来，薛定谔的思想大概是从以下四个方面的前提得出来的：

(1) 原子领域中电子的能量是分立的；

(2) 在一定的边界条件下，波动方程的振动频率只能取一系列分裂的本征频率；

(3) 哈密顿–雅可比方程不仅可用于描述粒子的运动，也可用于描述光波；

(4) 最关键的是爱因斯坦和德布罗意关于波粒二象性的思想。电子可以看成是一种波，其能量 E 和动量 p 可用德布罗意公式与波长 λ 和频率 ν 联系在一起。

波动力学形式简单明了，数学方法基本上是解偏微分方程，对大家都比较熟悉，也易于掌握，所以，人们普遍欢迎这一新理论。但是，波动力学和矩阵力学究竟有什么关系，谁也说不清楚，开始双方都抱有门户之见。后来，薛定谔认真钻研了海森伯等人的著作，于 1926 年发表了题为《论海森伯、玻恩与约丹和我的量子力学之间的关系》的论文，证明矩阵力学和波动力学的等价性，指出两者在数学上是完全等同的，可以通过数学变换从一种理论转换到另一种理论，它们都是以微观粒子的波粒二象性为基础。与此同时，泡利也作了同样的证明。

§10.5　波函数的物理诠释

薛定谔的波动力学提出后，人们普遍感到困惑的是其中某些关键概念（例如波函数）的物理意义还不明确。薛定谔把波函数解释成是描述物质波动性的一种振幅，用波群的运动来描述力学过程。在他的理论中，粒子不过是波集中在一起形成的波群，即所谓的波包。又是玻恩对薛定谔的波动力学作了重要补充，他在 1926 年 6 月发表题为《散射过程的量子力学》一文，指出：“迄今为止，海森伯创立的量子力学仅用于计算定态以及与跃迁相关的振幅，”但对于散射问题，则“在各种不同形式中，仅有薛定谔的形式看来能够胜任。”他在对两个自由粒子的散射问题进行计算后对波函数的物理意义作了探讨，指出：发现粒子的几率正

比于波函数ψ的平方。只要把波函数作这样的诠释，散射结果就有明确的意义。由于有了玻恩的诠释，波动力学才为公众普遍接受。

玻恩在回忆他是怎样想出这一诠释时写道：“爱因斯坦的观点又一次引导了我。他曾经把光波振幅解释为光子出现的几率密度，从而使粒子（光量子或光子）和波的二象性成为可以理解的。这个观念马上可以推广到ψ函数上：$|\psi^2|$必须是电子（或其他粒子）的几率密度[①]”。可见，爱因斯坦在量子力学的发展中起了何等重要的作用。

§10.6　测不准原理和互补原理的提出

测不准原理也叫不确定原理，是海森伯在1927年首先提出的，它反映了微观粒子运动的基本规律，是物理学中又一条重要原理。

海森伯在创立矩阵力学时，对形象化的图象采取否定态度。但他在表述中仍然需要“坐标”、“速度”之类的词汇，当然这些词汇已经不再等同于经典理论中的那些词汇。可是，究竟应该怎样理解这些词汇新的物理意义呢？海森伯抓住云室实验中观察电子径迹的问题进行思考。他试图用矩阵力学为电子径迹作出数学表述，可是没有成功。这使海森伯陷入困境。他反复考虑，意识到关键在于电子轨道的提法本身有问题。人们看到的径迹并不是电子的真正轨道，而是水滴串形成的雾迹，水滴远比电子大，所以人们也许只能观察到一系列电子的不确定的位置，而不是电子的准确轨道。因此，在量子力学中，一个电子只能以一定的不确定性处于某一位置，同时也只能以一定的不确定性具有某一速度。可以把这些不确定性限制在最小的范围内，但不能等于零。这就是海森伯对不确定性最初的思考。据海森伯晚年回忆，爱因斯坦1926年的一次谈话启发了他。爱因斯坦和海森伯讨论可不可以考虑电子轨道时，曾质问过海森伯：“难道说你是认真相信只有可观察量才应当进入物理理论吗？”对此海森伯答复说：“你处理相对论不正是这样的吗？你曾强调过绝对时间是不许可的，仅仅是因为绝对时间是不能被观察的。”爱因斯坦承认这一点，但是又说：“一个人把实际观察到的东西记在心里，会有启发性帮助的……在原则上试图单靠可观察量来建立理论，那是完全错误的。实际上恰恰相反，是理论决定我们能够观察到的东西……只有理论，即只有关于自然规律的知识，才能使我们从感觉印象推论出基本现象。”海森伯在1927年的论文一开头就说：“如果谁想要阐明‘一个物体的位置’（例如一个电子的位置）这个短语的意义，那么他就要描述一个能够测量‘电子位置’的实验，否则这个短语就根本没有意义。”

[①] 见M.玻恩，我这一代的物理学，（商务印书馆，1964）。

[①] W．Heisenberg,PhysicsandBeyond,Allen,1971p.62.

海森伯在谈到诸如位置与动量，或能量与时间这样一些正则共轭量的不确定关系时，说：“这种不确定性正是量子力学中出现统计关系的根本原因。”

海森伯测不准原理是通过一些实验来论证的。设想用一个γ射线显微镜来观察一个电子的坐标，因为γ射线显微镜的分辨本领受到波长λ的限制，所用光的波长λ越短，显微镜的分辨率越高，从而测定电子坐标不确定的程度△q 就越小，所以△q∝λ。但另一方面，光照射到电子，可以看成是光量子和电子的碰撞，波长λ越短，光量子的动量就越大，所以有△p∝1/λ。经过一番推理计算，海森伯得出：△q△p=h/4π。海森伯写道：“在位置被测定的一瞬，即当光子正被电子偏转时，电子的动量发生一个不连续的变化，因此，在确知电子位置的瞬间，关于它的动量我们就只能知道相应于其不连续变化的大小的程度。于是，位置测定得越准确，动量的测定就越不准确，反之亦然。”

海森伯还通过对确定原子磁矩的斯特恩–盖拉赫实验的分析证明，原子穿过偏转所费的时间△T 越长，能量测量中的不确定性△E 就越小。再加上德布罗意关系λ＝h/p，海森伯得到△E△T＜h，并且作出结论：“能量的准确测定如何，只有靠相应的对时间的测不准量才能得到。”

海森伯的测不准原理得到了玻尔的支持，但玻尔不同意他的推理方式，认为他建立测不准关系所用的基本概念有问题。双方发生过激烈的争论。玻尔的观点是测不准关系的基础在于波粒二象性，他说：“这才是问题的核心。”而海森伯说：“我们已经有了一个贯彻一致的数学推理方式，它把观察到的一切告诉了人们。在自然界中没有什么东西是这个数学推理方式不能描述的。”玻尔则说：“完备的物理解释应当绝对地高于数学形式体系。”

玻尔更着重于从哲学上考虑问题。1927 年玻尔作了《量子公设和原子理论的新进展》的演讲，提出著名的互补原理。他指出，在物理理论中，平常大家总是认为可以不必干涉所研究的对象，就可以观测该对象，但从量子理论看来却不可能，因为对原子体系的任何观测，都将涉及所观测的对象在观测过程中已经有所改变，因此不可能有单一的定义，平常所谓的因果性不复存在。对经典理论来说是互相排斥的不同性质，在量子理论中却成了互相补充的一些侧面。波粒二象性正是互补性的一个重要表现。测不准原理和其它量子力学结论也可从这里得到解释。

以玻尔、玻恩、海森伯为代表的一批物理学家关于量子力学的诠释不断发展，形成了对二十世纪物理学和哲学有重大影响的学派，人们称之为哥本哈根学派。

§10.7　关于量子力学完备性的争论

玻恩、海森伯、玻尔等人提出了量子力学的诠释以后，不久就遭到爱因斯坦和薛定谔等人的批评，他们不同意对方提出的波函数的几率解释、测不准原理和互补原理。双方展开了一场长达半个世纪的大论战，许多理论物理学家、实验物理学家和哲学家卷入了这场论战，这一论战至今还未结束。现在正在进行的关于隐参量的辩论就是他们论战的继续。

早在 1927 年 10 月召开的第五届索尔威会议上就爆发了公开论战。那次会议先由德布罗意介绍自己对波动力学的看法，提出了所谓的导波理论。在讨论中泡利对他的理论进行了激烈的批评，于是德布罗意声明放弃自己的观点。接着，玻恩和海森伯介绍矩阵力学波函数的诠释和测不准原理。最后他们说：“我们主张，量子力学是一种完备的理论，它的基本物理假说和数学假设是不能进一步被修改的。”玻尔也在会上发表了上节提到的演讲内容。这些话显然是说给爱因斯坦听的，但爱因斯坦一直保持沉默。只是在玻恩提到爱因斯坦的工作时，才起来作了即席发言，他用一个简单的理想实验来说明他的观点。

■图 10–1 爱因斯坦的示意图

“设 S 是一个遮光屏，在它上面开一个不大的孔 0（见图 10—1），P 是一个大半径的半球面形的照相胶片。假定电子沿着箭头所指示的方向落到遮光屏 S 上。这些电子的一部分穿过孔 0，由于孔小，而电子具有速度，因此它们均匀地分布在（按：即衍射到）所有的方向从而作用在胶片上。”这一事件的发生几率可由衍射的球面波在所考虑的点上的强度来量度。爱因斯坦说，可以有两种不同的观点来解释实验结果。按照第一种观点，德布罗意–薛定谔的ψ波不是代表一个电子，而是一团分布在空间中的电子云；量子论对于任何单个过程是什么也没有说的。它只给出关于一个相对说来无限多个基元过程的集合的知识。按照第二种观点，量子论可以完备地描述单个过程。落到遮光屏上的每个粒子，不是由位置和速度来表征而是用德布罗意–薛定谔波束来描述，这些描述概括了全部的事实和规律性。

在经过一番论证之后，爱因斯坦表示：“我认为德布罗意先生在这个方向上的探索是对的。仅就薛定谔波而言，第二种解释我认为是同相对性假设相矛盾的。”爱因斯坦实际上是反对玻尔等人对量子力学的诠释，他的反对意见引起了热烈讨论。会议本来的主题是《电子和光子》，实际上却变成了对量子力学诠释的一次全面讨论会。讨论的结果是玻尔、海森伯等人经过仔细分析，批驳了爱因斯坦的意见。爱因斯坦没有坚持己见，但他在内心是不服气的。

1930 年 10 月第六届索尔威会议召开。爱因斯坦主动出击，用一个被

[①] 爱因斯坦文集，第一卷，第 230 页。

人们称为《爱因斯坦光子箱》的理想实验为例，试图从能量和时间这一对正则变量的测量上来批驳测不准原理。为了提高测量时间和能量精确度，爱因斯坦想出了一个办法。他考虑一个具有理想反射壁的箱子（如图 10—2），里面充满辐射。箱子上有一快门，用箱内的时钟控制，快门启闭的时间间隔△t 可以任意短，每次只释放一个光子，能量可以通过重量的变化来测量。只要测出光子释放前后整个箱子重量的变化，就可以根据相对论质能转化公式 $E=mc^2$ 计算出来，箱内少了一个光子，能量相应地减少△E，△E 可以精确测定。这样，△t 和△E 就都可以同时精确测定，于是证明了测不准原理不能成立。

■图 10—2 爱因斯坦的光子箱

玻尔等人对爱因斯坦的光子箱实验毫无思想准备，一时无言以对。然而经过一个不眠之夜的紧张思考，玻尔终于找到了缺口。他发现爱因斯坦没有注意到广义相对论的红移效应。第二天一早，玻尔就在索尔威会议上发言，首先在黑板上画了一幅与图 10—3 相似的草图，实际上是昨天爱因斯坦那幅图的改进，他假设箱子是挂在弹簧秤下，箱子上安有指针，从标尺可以读出指针的位置。然后他说[①]：

“在给定的精确度△q 下对箱子位置的任一测定,都会给箱子的动量控制带来一个最小不确定量△p，它同△q 的由关系式△q△p≈h 联系着的。这一不确定量△p 显然又一定小于引力场的整段时间 T 中所能给予一个质量为△m 的物体的总冲量，或者

$$\triangle p \approx h/\triangle q < Tg\triangle m$$

其中 g 是重力恒量[①]。由此可见，指针读数 q 的精确度越高，秤量时间就必须越长，如果箱子及其内含物的质量要测到一个给定精确度的话。

■图 10—3 经玻尔“加工”的爱因斯坦的光子箱

“但是根据广义相对论，一个时钟当沿着引力方向移动一段距离△q 时，其快慢就会改变，它的读数在一段时间间隔 T 内将差一个量△T，它由下面的关系式给出：

$$\triangle T/T = g\triangle q/c^2$$

比较以上两式我们就可以看到，在秤量过程之后，我们关于时钟校准的知识中将有一个不确定量$\triangle T > h/c^2 \cdot \triangle m$。这个关系式和公式 $E=mc^2$ 一起，再次得出△T△E＞h，与测不准原理是一致的。”

玻尔的论证是如此地有力，使爱因斯坦不得不放弃自己的看法，承认量子力学在理论是自洽的，海森伯的测不准原理是合理的。以后爱因斯坦就转而论证量子力学理论的不完备性。

1935 年，爱因斯坦与波多尔斯基(B.Podolsky)以及罗森(N.Rosen)

[①] 转引自 M.Jammer,ThePhilosophyofQuantumMechanics,JohnWiley ＆sons, 1974, p.134.

[①] 即重力加速度。

合作，三人联名发表《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗？》一文，提出：“波函数所提供的关于物理实在的量子力学描述是不完备的，”表示相信，会有比量子力学更充分的描述。他们通过理想实验提出一个著名的悖论，人称 EPR 悖论。他们的论点是，完备理论的必要条件应该是：物理实在的每一要素在理论中都必需具有对应的部分，而要鉴别实在要素的充分条件则应是：“不干扰这个体系而能够对它作出确定的预测。”量子力学中一对共轭的物理量，按照海森伯的测不准原理，精确地知道了其中一个量就要排除对另一个量的精确认识。对于这一对共轭的物理量，在下面两种论断中只能选择一个：或者认为量子态ψ对于实在的描述是不完备的；或者认为对应于这两个不能对易的算符的物理量不能同时具有物理的实在性。

玻尔立即以同一题目作答。他认为：物理量本来就同测量条件和方法紧密联系，任何量子力学测量结果的报导给我们的不是关于客体的状态，而是关于这个客体浸没在其中的整个实验场合。这个整体性特点保证了量子力学描述的完备性。

以爱因斯坦为代表的 EPR 一派和以玻尔为代表的哥本哈根学派的争论，促使量子力学完备性的问题得到了系统的研究。1948 年爱因斯坦对这个问题又一次发表意见，进一步论证量子力学表述的不完备性。1949 年，玻尔发表了长篇论文，题为《就原子物理学的认识论问题和爱因斯坦商榷》，文中对长期论战进行了总结，系统阐明了自己的观点。而爱因斯坦也在这一年写了《对批评者的回答》，批评了哥本哈根学派的实证主义倾向。双方各不相让，论战持续进行，直到爱因斯坦去世后，玻尔仍旧没有放下他和爱因斯坦的争议，甚至在他去世的前一天，还在思考这个问题。他在办公室黑板上画的最后一张图，就是爱因斯坦 1930 年提出的那个光子箱。

一代科学伟人，他们既是严肃论战的对手，又是追求真理的战友，争论时不留情面，生活中友谊真诚，这样的事例在科学史中实在难得。

1953 年，玻姆(D.Bohm)提出隐参量理论，也认为哥本哈根学派的量子力学只给微观客体以统计性解释是不完备的。他提出有必要引入一些附加的参量，以便对微观客体作进一步描述，这些新参量就叫隐参量。1965 年，贝尔(J.Bell)在定域性隐参量理论的基础上，提出了一个著名的关系，人称贝尔不等式，于是有可能对隐参量理论进行实际的实验检验，从而判断哥本哈根学派对量子力学的解释是否正确。从 70 年代初开始，各国物理学家先后完成了十几项检验贝尔不等式的实验。大家主要从三个方面来进行实验，一是从原子级联辐射的两个光子的偏振关联分析，一是从电子偶素湮没所产生的两个γ光子的偏振关联分析，再就是质子–质子散射的自旋关联分析。这些实验结果的大多数都明显地违反了贝尔不等式，而与量子力学理论预言的相符。但也有几个实验满足贝尔

不等式。应该指出，即使实验证明贝尔不等式不成立，也不能认为对爱因斯坦–玻尔争论作出了最后裁决。目前这场论战还在进行之中，未有最后结论。

第十一章　原子核物理学和粒子物理学的发展

§11.1　历史概述

原子核物理学起源于放射性的研究，是 19 世纪末兴起的崭新课题。在这以前，人类对这个领域毫无所知。从事这项研究的物理学家，他们既没有史料可查，更没有理论可循，全靠自己用新创制的简陋仪器进行各种实验和观察，从中收集数据，总结经验，寻找规律，探索前进的方向，在原有的基础上不断开拓新的领域。原子核物理学的历史至今还不到一百年，但是发展很快。如果以 1932 年中子等发现作为核物理学真正诞生的标志，则从 1896 年发现放射性到 1932 年之前，可以说是核物理学的前期。这 30 多年中间，新发现层出不穷，大大丰富了微观世界的知识宝库，但是基本上还处于经验阶段；1933 年以后，原子核理论才逐渐形成，各种核模型提了出来，大量实验为“基本”粒子的性质提供依据。及至四、五十年代，核能的开发和利用，大大地促进了核物理学的进展，高能粒子的研究发展成粒子物理学。

§11.2　放射性的发现和研究

11.2.1　放射性的发现

1895 年底，伦琴将他的第一篇描述 X 射线的论文，《初步通信：一种新射线》和一些用 X 射线拍摄的照片分别寄送给各国知名学者。其中有一位是法国的彭加勒，他是著名的数学物理学家，当时任法国科学院院士，对物理学的基础研究和新进展非常关心，积极参与各种物理问题（例如阴极射线本性）的争论。法国科学院每周有一例会，物理学家在会上报告各自的成果并进行讨论。1896 年 1 月 20 日彭加勒参加了这天的例会，他带去了伦琴寄给他的论文和照片，展示给与会者看。正好在这个会上有两位法国医生。将他们拍到的人手 X 射线照片提交科学院审查。这件事大大激励了在场的物理学家亨利·贝克勒尔，他问这种射线是怎样产生的？彭加勒回答说，也许是从阴极对面发荧光的那部分管壁发出的，荧光和 X 射线可能是出于同一机理。不过他不太有把握。第二天，贝克勒尔就开始试验荧光物质在发荧光的同时会不会发出 X 射线。可是试来试去，却没有任何迹象。正当贝克勒尔准备放弃试验时，又读到彭加勒的一篇科普文章介绍 X 射线，文中又一次提到荧光和 X 射线可能同时产生的看法。贝克勒尔很受鼓舞，于是再次投入试验，终于找到了铀

盐有这种效应，他在 1896 年 2 月 24 日向法国科学院报告说[①]：

“我用两张厚黑纸……包了一张感光底片，纸非常厚，即使放在太阳光下晒一整天也不致使底片变色，我在黑纸上面放一层磷光物质，然后一起拿到太阳光下晒几小时。显影之后，我在底片上看到了磷光物质的黑影。……在磷光物质和黑纸之间夹一层玻璃，也作出了同样的实验。这样就排除了由于太阳光线的热从磷光物质发出某种蒸气而产生化学作用的可能性。所以从这些实验可作如下结论：所研究的磷光物质会发射一种辐射，能贯穿对光不透明的纸而使银盐还原。”

贝克勒尔所指的磷光物质就是铀盐。当时人们以为，荧光和磷光没有什么本质上的不同，只是发光时间的长短有区别而已。这里，贝克勒尔误以为 X 射线的产生是由于太阳光照射铀盐的结果。

一个星期以后，当法国科学院于 3 月 2 日再次例会时，贝克勒尔已经找到了正确的答案。这也许是偶然的机遇，但偶然中有必然。他本想在会前再做一些实验，可是 2 月 26、27 日连续阴天，他只好把所有器材放在抽屉里，铀盐也搁在包好的底片上，等待好天气。在对科学院的第二次报告中，贝克勒尔写道：

“由于好几天没有出太阳，我在 3 月 1 日把底片冲了出来，原想也许会得到非常微弱的影子。相反，底片的廓影十分强烈。我立即想到，这一作用很可能在黑暗中也能进行。”

贝克勒尔意识到，这一发现非常重要，说明原来以为荧光（和磷光）与 X 射线属于同一机理的设想不符合实际。他立即放弃了这种想法，转而试验各种因素，例如铀盐的状态（是晶体还是溶液）、温度、放电等等对这种辐射的影响，证明确与磷光效应无关。他发现，纯金属铀的辐射比铀化合物强好多倍。他还发现，铀盐的这种辐射不仅能使底片感光，还能使气体电离变成导体。这个现象为别人继续研究放射性提供了一种新的方法。

贝克勒尔搞清楚了铀盐辐射的性质后，在同年 5 月 18 日科学院的例会上再次报告，宣布这种贯穿辐射是自发现象，只要有铀这种元素存在，就会产生贯穿辐射。以后，这种辐射被人们叫做贝克勒尔射线，以区别于当时人们普遍称呼为 X 射线的伦琴射线。

贝克勒尔发现放射性虽然没有伦琴发现 X 射线那样轰动一时，意义却更为深远，因为这是人类第一次接触到核现象，为后来的发展开避了道路。

贝克勒尔的发现，往往被后人作为科学发现的偶然性之重要例证。不过，贝克勒尔自己却喜欢说：在他的实验室里发现放射性是“完全合

[①] A.Romer,TheDiscoveryofRadioactivityandTransmutation,Dover（1964）p.8.

乎逻辑的。”[①]这是因为亨利·贝克勒尔具有特殊有利的条件，他的祖传三代都是研究磷光的世家。祖父名安东尼·贝克勒尔(AntoineCesarBecquerel,1788—1878)是巴黎自然历史博物馆的物理教授，广泛研究过矿物学、化学以至磷光；父亲爱德蒙·贝克勒尔(EdmondBecquerel，1820—1891)继承父业，是欧洲有名的固体磷光专家，在他家的实验室里拥有各种各样的荧光和磷光物质，长年进行各种试验，其中也包括铀盐。19 世纪后半叶，铀盐开始广泛用于照相术、染色、上釉，后来成了商品化的化学试剂。由于铀盐会发出特别明亮的磷光，爱德蒙·贝克勒尔曾特地对它进行了研究。这些工作在 1891 年以后都由亨利·贝克勒尔继承了下来。更重要的是，前辈们注重收集实验资料，尊重客观事实的科学态度帮助亨利·贝克勒尔很快找到了正确的结论。由此可见，亨利·贝克勒尔之所以成为放射学的先驱，的确不是偶然的。

11.2.2　钋和镭的发现

贝克勒尔的发现由于居里夫妇的工作迅速地扩大了战果。居里夫人原名玛丽·斯可罗多夫斯卡(MarieSklodowska，1867—1934)，波兰人，1891 年到巴黎攻读物理后与皮埃尔·居里(PierreCurie，1859—1906)结婚。1897 年，居里夫人选放射性作为自己的博士论文题目。在重复贝克勒尔的铀盐辐射实验时，将居里两兄弟早先发现的压电效应用于测量游离电流，得到了大量精确的数据，使放射性的研究很快走上了严密定量的道路。

居里夫人在 1898 年 4 月发表的第一篇论文中写道[①]：

“我用……一平板电容器，极板之一覆盖了均匀的一层铀或其他细研过的物质。极板直径 8 厘米，极间距离 3 厘米，极板间加有 100 伏电位差，穿过电容器的电流用静电计和一压电石英晶体测量绝对值。”

居里夫人首先证实了贝克勒尔关于铀盐辐射的强度与化合物中铀的含量成正比的结论，但她不满足于局限在铀盐，决定对已知的各种元素进行普查。正好这时，施密特(G.C.Schmidt，1856—1949)发现钍也具有贯穿辐射，居里夫人迅即予以证实。她找来各种矿石和化学品，一一按上述方法做了试验。1898 年取得的初步结果表明：绝大多数材料的游离电流小于 0.3×10^{-12} 安，而沥青铀矿可达 83×10^{-12} 安，氧化钍和辉铜矿（内含磷酸铀）约 53×10^{-12} 安。于是，居里夫人断定钍也是一种放射性元素。她还发现沥青铀矿和辉铜矿比纯金属铀的活性还强得多。居里夫人在论文中写道：

“两种铀矿……比铀自身还更活泼。这个事实……使人相信，在这

---

① L.Badash,Arch.Int.Hist.Sci.,18（1965）p.55.

① M.Curie,ComptesRendus（1898），转引自 Dic.Sci.Bio.,vol.3, p.498.

些矿中可能含有比铀活泼得多的元素。”

居里夫人相信，既然不止一种元素能自发地放出辐射，而这又是一种原子现象，肯定它具有普遍性。就在这一篇论文中，居里夫人首次使用了“放射性”一词。

接着，居里夫人在居里先生的协助下，进行了艰苦的提纯工作。他们从铀矿渣中分离出含量仅占百分之一甚至更少的新元素。1898 年 7 月，分离出铋的成分带强烈的放射性，比同样质量的铀强 400 倍。

他们进一步确证，放射性并不是来自铋本身，而是混在铋中的一种微量元素。经过反复试验，终于从沉淀物中找到了那种放射性物质，居里夫妇写道[①]：

“我们相信，从沥青铀矿提取的物质含有一种迄今未知的金属，在分析特性时跟铋有联系。如果这种新金属的存在得到证实，我们建议称之为钋(Polonium)，这个名称是根据我们之一的祖国命名的。”

他们继续进行试验，又发现在钡盐中有更强的放射性。他们“认为还有第二种物质，放射性更强，化学性质则与第一种完全不同。用硫化氢、硫化铵或氨都无法使之沉淀；”“这种新的放射性物质在化学性质上完全象纯钡，其氯化物溶于水，却不溶于浓盐酸和酒精。由它可得钡的光谱。但我们相信，这种物质尽管绝大部分由钡组成，必定还有一种产生放射性的新元素，其化学性质极其接近于钡。”

“我们进行了一系列的分离，得到越来越活泼的氯化物，其活性竟比铀大 900 倍以上。种种理由使我们相信，新的放射性物质中有一种新元素，我们建议命名为镭(Radium)。”

居里夫妇历尽辛苦，用分离结晶的方法不断提高含镭的氯化钡中镭的含量。1899 年得到了可使游离电流达 10^{-7} 安的晶体，比铀的放射性强 7500 倍，后来竟达到了 100000 倍，然而仍然不是纯粹的镭盐。

为了提炼出足以进行实验的纯镭盐，居里夫妇不得不从成吨的矿渣石中用人工进行提炼。经过 4 年的奋斗终于从 8 吨矿渣石提取了 0.1 克的纯镭盐。1902 年，居里夫妇宣布，他们测得镭的原子量为 225，找到了两根非常明亮的特征光谱线，这时，镭的存在才得到公认。

钋和镭的发现大大促进了放射性的研究。

11.2.3 α、β与γ射线的发现

尽管有新的放射性元素被发现，但辐射本身的性质并不清楚。来自新西兰，J.J.汤姆生的研究生卢瑟福 (Ernest Rutherford，1871—1937) 从贝克勒尔射线“分离”出两种性质不同的射线——α射线与β射线，开始了对这种贯穿辐射的探索。卢瑟福是在 1895 年来到卡文迪什实验室

---

① P.＆M.Curie,ComptesRendus，127（1898）175，转引自 Magie, A Source Bookin Physics, McGraw-Hill（1935）p.613

的，起初从事自己早就涉及的无线电检波研究。1896 年，被 X 射线的奇特性吸引，也卷入了汤姆生用 X 射线引起空气游离的研究。这时，卢瑟福注意到了贝克勒尔发现铀辐射也会引起空气游离，决定做些试验，看看这两种情况有什么不同。贝克勒尔在论文中曾提过，铀辐射的性质跟 X 射线的根本区别在于：铀辐射可以折射和偏振，而 X 射线则不能。于是，卢瑟福也用一些玻璃、铝和石蜡之类材料做成的棱镜进行试验。他从照相底片上没有看出铀辐射有任何偏折，判定贝克勒尔的说法有错。继而，他想从贯穿能力上加以鉴别。于是，就用一系列的极薄的铝箔放在铀盐上，而铀盐则置于电容器两平行板之一的上面。加电压后从串接于电容器的静电计上读取游离电流值。就在汇集的数据中，卢瑟福看出有两种不同的吸收变化率，说明辐射具有两种不同的成分。他在题为《铀辐射和它产生的电导》一文中写道：

“这些实验表明铀辐射是复杂的，至少有两种明显不同的辐射——一种非常容易被吸收，为方便起见称之为 α 辐射；另一种具有更强的贯穿本领，称之为 β 辐射”。

这篇文章作于 1898 年初，由于同年 9 月卢瑟福到加拿大蒙特利尔(Montreal)市的麦克吉尔(McGill)大学担任教授职务，此文乃迟于年底才从麦克吉尔大学寄出，发表于 1899 年《哲学杂志》上。所以，两种贯穿能力不同的辐射——α、β 射线的存在是在 1899 年才为公众知道。

这个时候，已有多人用磁场使贯穿辐射偏转。盖赛尔(F.Giesel)和梅益尔(StefanMeyer)分别观测到贯穿辐射有两种成分，一种成分受磁场偏转，一种成分不受磁场偏转。居里夫妇则从偏转方向证明受磁场偏转的成分带的是负电。这一结论随即为贝克勒尔和唐恩(F.E.Dorn)的电场偏转所证实。居里更证明镭的这两种辐射即 α 与 β 射线，不受磁场偏转的是 α 射线，受磁场偏转的是 β 射线。1900 年，贝克勒尔进一步从电场和磁场的偏转确定 β 射线的 e/m 为 10^{11} 库仑/千克，与阴极射线同数量级，速度约为 2×10^{8} 米/秒，肯定 β 粒子就是高速的电子。至此，β 射线的本质基本清楚了，可是 α 射线仍旧是个谜。

γ 射线是 1900 年由法国物理学家维拉德(PaulVillard,1860—1934)发现的。他是一位热忱的实验家，积极从事阴极射线和 X 射线的研究。当时他正研究阴极射线的反射、折射性质，试图将含镭的氯化钡拿来比较，看看它的射线有没有类似行为。就在这一实验中，他发现了 γ 射线。维拉德把镭源放在铅管中，铅管一侧开了一个 6 毫米宽的长方口，让一束辐射射出，经过磁场后用照片记录其轨迹。照片包在几层黑纸里，前面还有一张铝箔挡着，β 射线肯定已被偏折，剩下的只是 α 射线，α 射线肯定不能穿透。可是照片记录下的轨迹，除了在预期的偏角处有 β 射线的轨迹外，在无偏角的方向上却仍然记录到了轨迹，即使加 0.2 毫米的铅箔仍能穿透，显然，这不是 α 射线。于是维拉德写道：

“上述事实导致如下结论：在镭发出的不受偏折的辐射成分中，含有贯穿力非常强的辐射，它可以穿过金属箔片，用照相法显示出来。”

后来，卢瑟福称这一贯穿力非常强的辐射为γ射线，并于 1902 年 11 月初，第一次对镭辐射进行了全面的分类。他写道：放射性物质——例如镭，放出三种不同类型的辐射：“(1) α射线，很容易被薄层物质吸收……。

(2) β射线，由高速的负电粒子组成，从所有方面看都很象真空管中的阴极射线。

(3) γ射线，在磁场中不受偏折，具有极强的贯穿力。”

11.2.4　卢瑟福确定α射线的本质

卢瑟福对放射性辐射的分类很快就得到了同行的公认，并运用于放射性的研究中。后来陆续有新的认识，但是α射线的本质却难以判断。1900 年，皮埃尔·居里从游离作用发现，不同的放射性元素放出的α射线在空气中穿越的距离不一样，钋放出的走 4 厘米，镭放出的走 6.7 厘米。4 种不同的镭盐，尽管其活性和化学性质各不相同，发出的α射线却射程相同，都是 6.7 厘米。与此同时，居里夫人发现游离的衰减率不是常数，随距离的增大而增大，与一般射线的规律不符。据此，居里夫人认为，“α射线的行为就象弹丸那样，在前进中会由于克服阻力而失去动能。”斯特拉特猜测，这种“不可偏的射线（即α射线）可能是某种带正电的快速粒子，其质量大到和原子一样，正是由于质量远大于电子，所以在磁场中运动方向不显示偏折。卢瑟福赞同他们的看法，认为问题的关键在于用实验证明α射线在磁场中确有偏转，哪怕偏转很小，也能作出判决性的结论。他大概从 1901 年起就开始做这项试验，用当时他能获得的最强的电磁铁，做了一年多却毫无成功的迹象，但他相信居里和斯特拉特的粒子假说是言之有据的。1903 年，他终于用自制的简易仪器，但却是精心设计的实验，判定α射线确受磁场偏转，从方向上判断是带正电荷，接着又从电场和磁场的共同作用，初步测出荷质比与氢离子同数量级，速度大约为光速的十分之一。这样就判明了α射线是原子类型的带正电的粒子流。

■图 11–1 卢瑟福的光谱实验

至于是哪种类型的原子，则一时难以确定，根据种种现象和事实，有人猜测是比氢重的氦。用计数的方法已经测出，α粒子的电荷是电子的两倍。再从荷质比的数据可以推得，其质量是氢原子的 4 倍，这正是氦离子的参数。含铀和含钍的矿石往往伴随有氦气，一经加热就会释放出来，似乎暗示铀、钍等放射性元素在自发衰变中会生成新的元素——氦。但是也有人说，这种氦气也许是在α粒子轰击之下驱赶出来的。又是卢瑟福，他于 1909 年以巧妙的方法从光谱作出了判决。方法是用一极薄的玻璃管密封着镭射气（一种镭衰变后生成的放射性气体），玻璃薄

到这样的程度以至于α粒子可以穿越无阻，而普通气体分子却不能。他把这支射气管装在另一大玻璃器皿中，然后用水银驱赶含α粒子的气体至一放电管，进行放电试验。经光谱分析找到了氦的特征谱线。卢瑟福和他的学生罗依兹(T.Royds）写道[①]：“实验作出了判决性的证明，证明α粒子在失去电荷之后就是氦原子。”

确定α射线的本质对认识放射性元素的衰变规律有很重要的意义，因为从此就可以对衰变规律作出全面解释。这就是为什么卢瑟福狠抓α射线不放的目的所在。

11.2.5 放射性衰变规律的发现

放射性衰变规律是大量实验事实的总结，它是核物理学早期发展的重要基石之一。这些规律的发现与卢瑟福及其合作者运用实验进行探索的研究方法有密切关系。早在 1899 年，皮埃尔·居里发现镭和钍可以使周围的物质获得暂时的放射性，他称之为感生放射性。他注意到，感生放射性的强度会随时间变化，开始逐渐增加直至达到某一限度，该限度不依赖这些物质的种类，只和放射源有关。他认为，这是放射性引起的二次放射。如果把这些物质加热或置于真空中，感生放射性就会减轻。1900 年，克鲁克斯也发现：如果氢氧化铁在铀盐溶液中沉淀，所有的放射性都到沉淀物上，而铀却没有放射性，几天后，沉淀物失去了放射性，铀又恢复了放射性。

诸如此类令人迷惑的现象层出不穷。怎样才能拨开迷雾见到光明呢？

1899 年，卢瑟福来到加拿大麦克吉尔大学后，电机系的一位教授欧文斯(R.B.Owens，1870—1940)曾一度和他合作，共同研究钍的放射性，他们选取氧化钍作为试验对象，和卢瑟福一年前一样，用的是测量游离电流的方法。欧文斯发现这种材料和铀盐大不一样，游离电流极不稳定，他怀疑是由于空气扰动，于是改用密闭的游离室。游离电流的测量虽然稳定了下来，但却发现了新的现象。欧文斯注意到需要经过一段时间才能达到最大值，如果开启小门，电流下降，但经过一段时间，又会恢复到最大值。这件事情引起了卢瑟福的注意。通过试验，他证实是氧化钍会放出一种具有放射性的气体，他称之为钍射气，正是由于钍射气的散布，影响了游离电流的稳定性。后来，他和化学家索迪(F.Soddy，1877—1956)合作继续研究射气的产生和效应，证明钍射气是一种很重的惰性气体。不久，德国物理学家唐恩(F.E.Dorn)发现了镭射气，1905 年盖赛尔(F.O.Giesel）发现锕射气。

卢瑟福从钍射气的研究中发现它的放射性衰减得很快。后来查明，所有放射性物质都有这一特性，只是时间长短不同。为了定量表征这一

[①] E.Rutherford and T.Royds, Phil. Mag.17(1900)p.281

特性，卢瑟福引用了半衰期一词。他还发现，放射性的强度随时间的变化遵守如下规律：

$$I = I_0 e^{-\lambda t}$$

I 是原来强度为 I_0 的放射性经时间 t 后的强度，λ叫做衰减系数，与放射性物质有关。

射气的发现的事实完全解释了“感生放射性”，原来是镭或铀衰变为射气后，逐渐扩散到周围，附在周围物体的表面上，并且随着时间的推移，射气的量和活性逐渐达到最高值而趋于平衡。

■图 11–2 放射性的衰变曲线

至于克鲁克斯发现的铀盐沉淀物，也可作类似的解释。当时克鲁克斯判断，在沉淀物中有一很少的成分，它可以获得铀盐的全部活性。由于对这种成分毫无了解，所以克鲁克斯称之为铀 X。他还发现，铀 X 的活性会逐渐衰减，而剩余的铀却逐渐恢复活性。经过足够长的时间又可以从铀分离出活性的铀 X。

卢瑟福和索迪注意到了克鲁克斯的实验，他们发现钍也有类似变化。1901 年末，索迪从氢氧化钍溶液中分离出放射性很强的物质，他仿照克鲁克斯，称之为钍 X，分离后的氢氧化钍几乎失去了放射性。再过一些时候，钍 X 的放射性完全消失，氢氧化钍则恢复了放射性。他们判断，这件事说明钍放射性实际上是钍 X 的生成和衰变的总和，两者都作指数变化，一个上升，一个下降，总和则保持常值。据此，他们进一步提出了放射性元素衰变的理论。1902 年 9 月—1903 年 5 月间，他们连续发表了 6 篇论文，主要的论点是：

（1）在放射性元素镭、钍和铀中连续产生新物质，这些新的物质自身也是放射性；

（2）当几个变化一起发生时，它们不是同时的，而是相继的，即钍产生钍 X，钍 X 产生钍射气等等；

（3）放射性现象包含下列过程：一部分原子自发衰变为不同性质的原子，这类变化性质上与以前在化学中涉及的任何变化都不同，因为能量来自与化学反应无关的原子内部。

（4）单位时间衰变的原子数与在场的尚未衰变的原子数 N_t 有确定的比例。比值λ是放射性物质的特征常数，即：

$$\frac{dN_t}{dt} = -\lambda N_t$$

（5）发出的射线是原子变为下一代原子的伴生物，实际也是变化的结果。

1903—1905 年，卢瑟福证实，镭射气之后还有一些成员，1903 年夏发现镭 A、镭 B 和镭 C，1905 年又发现镭 D、镭 E 和镭 F。他猜测，这些生成物中必有一个与钋等同，后来证明镭 F 就是钋。最引人注目的是镭 B 的发现，因为那时没有发现在其转变为镭 C 时有任何辐射，无法证明它

的存在，唯一的理由是，如果假设镭 C 是镭 A 的直接生成物，就违背了1902—1903 年的放射性衰变规律。

放射性衰变规律的提出，引起了这样的疑问：镭既然是从自然界的铀矿中发现的，就应是铀的后代。铀是原子量高于镭的少数几个元素之一，而镭在沥青铀矿中的比例，大体上与镭和铀的活性之比相符。1904 年，索迪做实验证明，镭并不是铀的直接产物。而卢瑟福的助手、耶鲁大学的波尔特武德(B.B.Boltwood，1870—1927)经过多年试验，终于在 1907 年，成功地证明了镭是一种新发现的放射性元素的直接后代。他把这个新元素取名为鍰(Ionium)，这个新元素是从铀衍生出来的。

由于放射性系的新成员不断被发现，人们看到往往有两个或三人不同的元素有相同的化学特性，在周期表中属于同一位置。例如：曾经一度与卢瑟福合作，后来到伦敦大学拉姆赛(WilliamRamsay)处工作的哈恩(OttoHahn)发现钍 X 的母体，他命名为镭一钍。这种成分无法用化学方法跟钍分开。卢瑟福的另两名合作者鲁塞尔(A.S.Russell)和罗西(K.Rossi)也证明，鍰的光谱无法与钍的光谱分辨开。然而，这三种物质的放射性质却迥异。原子量也不相同，化学上则是同一元素的不同形式。索迪等人对此进行了多年的研究，后来索迪称之为同位素。

同位素的存在有一引人注目的实例。放射性变化的最终产物是什么？早在 1905 年，卢瑟福就已经认为镭系的最终产物不象是氦，看来也许是铅，因为铅是铀–镭矿中含量最多的稳定成分。果然，这个建议被实验证实，还发现铅也是钍系的最终产物。然而，这两种铅的原子量并不相同。镭铅是 206，钍铅是 208，而普通铅的原子量却是 207.20。

1913 年，索迪、鲁塞尔和法詹斯(K. Fajans)提出位移定律。系统总结了原子衰变的规律。这个定律的内容是：发射 α 粒子的衰变使原子在周期表中下降两格（原子量减小），发射 β 粒子的衰变使原子上升一格，但原子量不变。

由于卢瑟福在这以前早就弄清了 α 粒子的性质，这一定律的物理实质就是不言而喻的了。

到此为止，原子转变的现象仅限于天然范围。人们自然要问，有没有可能用人工方法进行原子转变，以实现自古以来人类幻想中的“点金术”呢？

§11.3　人工核反应的初次实现

用人为的方法实现原子的转变也要首先归功于卢瑟福。1914 年，卢瑟福的学生马斯登在用闪烁镜观测 α 射线在空气中的射程时，注意到出现了一些射程特别长的粒子。这是反常的现象，因为当时已经掌握，α 粒子在空气中的射程大约为 7 厘米，而他得到的却长达 40 厘米。马斯登

反复检验，证明实验没有错误。他解释是由于空气中的氢离子（即质子）受到α粒子撞击所致，氢比氮轻 4 倍，所以碰撞后氢的速度要比原来α粒子的速度大得多。不久，马斯登因工作调动离开曼彻斯特，就没有继续这项工作。

但是卢瑟福没有放过这件事。其时正值第一次世界大战，他虽忙于军事任务，却抽空做了大量实验。他在 1917 年底给玻尔的信中写道："我已经得到了一些终将证实为具有巨大重要性的结果……我试图用这种方法把原子击破。"

卢瑟福在助手的协助下，前后做了 3 年左右的实验，于 1919 年发表了惊人的结果，宣布实现了轻元素原子的转变。

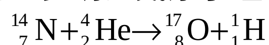
卢瑟福的实验装置极为简单，（如图 11–3）。这是一个密封的容器 A，从活栓可灌入或抽去气体。α射线源 D 放在可以左右移动的支架上，位置由刻度尺 B 指示。不远处有闪烁屏 S，背后用显微镜 M 观察。他先后将不同的气体充入容器。当用氮气充入时，发现放射源至闪烁屏的距离即使超过α粒子的射程很多，仍有闪烁可见。射程之长确与氢离子的射程相近；而容器充以氧气时却没有这种情况。卢瑟福经过反复试验。终于判定是氮原子在α粒子的轰击下发生了核的转变，从氮核中放出了氢核。他在论文中写道[①]：

■图 11–3 卢瑟福用α粒子轰击轻元素的实验装置

"我们必须作这样的结论，氮原子在快速α粒子的直接碰撞所产生的巨力作用下转变了，放出的氢原子曾是氮核的组成部分……由整个结果看出，如果α粒子——或类似的投射粒子——有更大的能量可供实验的话，我们就可以期望击破许多轻元素的核结构。"

从上述简单而且原始的实验，得到了如此重大的科学结论！卢瑟福的研究开辟了人工核反应的道路。

1919 年，卢瑟福继 J.J.汤姆生任剑桥大学卡文迪什实验室物理教授，在那里，他进一步确证氮原子经α粒子轰击发生了如下转变：



$$^{14}_{7}N+^{4}_{2}He\rightarrow^{17}_{8}O+^{1}_{1}H$$

后来，卡文迪什实验室的布拉开特(P.M.S.Blackett)用威尔逊云室记录粒子的径迹，找到了氮气在α粒子轰击下产生氢核的证据。不过几率非常小，在两万多张照片中，只有八条径迹出现氢核径迹的分叉。

1921 年卢瑟福和查德威克(JamesChadwick)发现硼、氟、钠、铝和磷都可以产生类似的转变。

11.4 探测仪器的改善促进了核物理学的发展

[①] J. Chadwick(ed.), The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson, Inter- science, Vol.2(1965)p.585．

11.4.1　早年的仪器设备

对于核物理学来说，由于这个领域是完全陌生的，全靠人们通过实验进行探索，所以仪器设备的创制至关重要。然而，从 19 世纪末到 20 世纪初，人类刚开始触及核现象，初创阶段实验者使用的仪器极其简陋。

在核物理的发源地之一的英国卡文迪什实验室，仪器多为自制，有的甚至是木制品。价值 5 英镑的用于放射性研究的新型静电计被认为太贵。研究生们往往自己动手制作静电计。直到 1906 年，卢瑟福还介绍说金箔验电器是最理想的仪器。据说：金箔、悬丝、火漆乃是当时实验家必备的基本器材，而感应圈、水银柱泵、干电池或蓄电池则是实验室中最重要的一部分设备。当时甚至机械真空泵还没有，那是 1905 年才由德国物理学家盖德发明的。水银柱泵也能达到“很高”的真空度，例如 10^{-3} 毫米汞柱，但非常费时，需要实验者付出极大的耐力。哈恩回忆他和卢瑟福在蒙特利尔的时期(1905—1906 年），讲到经费不足、仪器简陋时说[①]：

“我们用大的锡罐头皮做β和γ射线静电计，在它上面焊上更小些的烟草盒或香烟盒。绝缘用硫磺，因为我们没有琥珀。”

就是靠这样一些简易自制的仪器，开拓了核物理学的新领域。

在第八章中，我们已经介绍过，原子核是从α粒子大角度散射实验发现的。观测α粒子散射靠的是闪锌屏，用肉眼通过显微镜一个个计数。实验者要在暗室中长时间地观测闪光，积累数据。这样的工作既单调、又乏人。但是观测结果却比照像法精确得多，所以这种方法在早期核物理学中有重要地位。甚至到 20 世纪 20 年代，闪锌计数还是物理学家必须受到的基本训练呢！

但是，如果停留在这个水平上，物理学就难以前进了。正是由于一系列新的创造和发明，原子核物理学才得到进一步的发展。

11.4.2　盖革计数器

盖革计数器起源于放射性的游离作用，早在 1896 年贝克勒尔就发现了，后来居里夫妇和卢瑟福都利用这一效应来测量放射性。剑桥大学卡文迪什实验室的汤森德(J. A. Townsend) 曾和卢瑟福共同作过研究工作，在研究气体导电时发现一种碰撞游离的现象，即在低压气体中加以高电压，这个电压虽然还不足以引起火花放电，但却能使气体中的离子加速，当加速到一定能量后与其它分子碰撞就会产生新的离子。新的离子又被电场加速，这样一连串地碰撞下去，就会引起雪崩似的电离。根据这个道理，卢瑟福和盖革做了一个电离管，管内装有圆柱形电极，电极轴线上按一根金属丝。管的一端开有小孔，嵌以极薄的云母片，可以

[①] E. N. Jenkins, Radioactivity, Butterworth, 1979.

让α粒子穿过。电极与金属丝之间加电压，串一静电计测电流。电压调整到正好小于点火电压。如果有α粒子平行于轴线穿过两电极之间，就会引起游离。不过这种装置使用起来很不方便，一百万颗粒子也许只有一颗能从小孔平行穿入，而且反应很不灵敏，恢复时间也很慢。1912 年，他们改用一种弦线静电计来进行观测，弦线的张弛可随意调整，弦线的振动用光学方法记录在移动的胶卷上，这样，观测速度大大提高，甚至可以达到每分钟 14 次。

1913 年，盖革继续改进计数管，仍然根据碰撞游离的原理，不过用一根金属杆代替了金属丝，再接于弦线静电计，杆的顶端很细，正对电离管的入口，这样就大大增加了灵敏度。这样的计数管对β粒子也有效。

及至 1928 年，缪勒（Müller）对盖革计数管又加改进，仍用原先的同轴柱形电极，同时配以电子线路，使计数技术大大提高了一步，在核物理实验中得到了极广泛的应用。

11.4.3 威尔逊云室

云室是 C.T.R.威尔逊(CharlesThomsonReesWilson，1869—1959)在 1911 年发明的。由于它能直接显示粒子运动的径迹，所以一经出现就成了研究核物理的重要工具。后来发展为汽泡室，在粒子物理学中继续发挥作用。

C.T.R.威尔逊是卡文迪什实验室出身的又一位实验物理学家。1896 年获博士学位后，先当表演员，后当物理实验教师。他业余对气象有特殊爱好，有兴趣了解云雾现象的成因，于是在实验室中进行模拟实验。1895 年初，他曾采用爱特肯(J.Aitkin)创造的方法，让潮湿空气膨胀，制造人工云雾。在实验中他发现，爱特肯有一个经验不符合事实，即当空气中没有尘埃时，不能产生云雾。威尔逊的结果却是，如果膨胀比足够大，也可能出现云雾。显然，在尘埃完全清除的密室中，一定还有别的凝结核心，他想到可能是出现了某种带电的原子。

正好不久以后，J.J.汤姆生和卢瑟福研究 X 射线的电离作用，提出气体电离理论，威尔逊用他还不成熟的云室方法，对这个理论进行验证。他用 X 射线照射云室，可使原来在膨胀时没有液粒产生的云室，立即产生云雾，肯定了电离作用，同时，也使同事们认识到这种方法的用途，也许可以用来显示射线。

在这以后，威尔逊坚持实验研究，不断改进方法，经历十余年，终于在 1911 年从云室的照片中找到了α、β和电子的径迹。

1925 年，布拉开特进一步改进云室方法，他把云室置于两个盖革计数器之间，安排了一套电路，使得只有当带电粒子相继穿过两个计数器，才能使云室动作，并拍下照片。这种自动方法大大地提高了探测粒子的效率。就在这一年，他从改进的云室拍摄到了原子人工转变的证据。

1923 年，康普顿发现 X 射线散射后波长变长的现象，他用光量子与

电子碰撞动量与能量守恒的原理作出正确解释。正在人们将信将疑之际，威尔逊用云室方法找到了反冲电子的径迹，令人信服地证实了 X 射线的波粒二象性。

11.4.4　质谱仪精确测定同位素的质量

质谱仪是在 J.J.汤姆生长期研究正射线的基础上创制出来的。所谓正射线，实际上就是正离子束。他用磁场使之偏转，再用电场沿垂直方向偏转，于是在照象底片上记录下抛物线轨迹。质量不同的正离子形成不同的抛物线，由此可以鉴别各种原子的质量，不过结果相当粗略。

1910 年，阿斯通(E.W.Aston，1877—1945)开始协助汤姆生改进正射线的设备，并于 1912 年投入使用，仪器的分辨率虽然不同，但质量数相差 10%的抛物线已经可以分开。

阿斯通在测试中，曾将氖气充入正射线仪内，电离后使之偏转，出乎意料，原子量为 20.2 的氖气竟出现了两条抛物线，一条粗的相当于 20 个原子质量单位，另一条相当于 22 个原子质量单位，非常暗淡。

后来知道这是第一次获得的非放射性同位素的信息。可是当时汤姆生误判为可能是一种特殊分子，例如 N_2H_2 之类，它的分子量正好是 22。当时还没有同位素的概念。但是，阿斯通希望通过事实作出结论，他找来最纯的氖做试验，结果仍然是两条抛物线，使他建立了氖有两种不同成分的信心。

正当他用不同途径试图分离这两种成分之际，爆发了第一次世界大战。战后，他用电磁聚焦的方法继续这项工作，终于获得成功，并确证氖是由两种成分 ^{20}Ne 和 ^{22}Ne 组成的。阿斯通称他的仪器为质谱仪。用这套仪器他继续分离出了氯、汞、氮及其它几种稀有气体的同位素。

与此同时，美国芝加哥大学的丹普斯特(A.J.Dempster)也独立设计出了质谱计。他精确地测定了许多金属，例如镁、锂、钾、钙及锌的同位素的丰度。

以上举的几个例子说明，经过二、三十年的摸索，物理学家已经可以借助许多特制的仪器设备来探测原子核的各种性质和行为，这就极大地推动了核物理的前进步伐。

§11.5　宇宙线和正电子的发现

在现代物理学发展史中，宇宙线的研究占有一定的地位，许多新的粒子都是首先在宇宙线中发现的。例如：用云室发现了正电子、μ介子等，用原子核乳胶发现了π介子等。在高能加速器未出现以前，人们只有靠天然的源泉进行研究，而宇宙线就是理想的观测对象，它具有高能量、低强度的特点，很便于观测。所以它一经发现，就成为人们竞相研究的对象。

11.5.1 早期迹象

宇宙线的迹象早在最初运用游离室观测放射性时就被人们注意到了。当初曾一度认为验电器的残余漏电是由于空气或尘土中含有放射性物质。1903 年，卢瑟福和库克(H.L.Cooke)曾研究过这个问题。他们发现，如果小心地把所有放射源移走，在验电器中每立方厘米内，每秒钟还会有大约十对离子不断产生。他们用铁和铅把验电器完全屏蔽起来，离子的产生几乎可减少 3/10。他们在论文中提出设想，也许有某种贯穿力极强，类似于γ射线的某种辐射从外面射进验电器，从而激发出二次放射性。

为了搞清这个现象的缘由，莱特(Wright)于 1909 年在加拿大安大略(Ontario)湖的冰面上重复上述实验，游离数略有减小，看来可能是离地面远的原因。1910 年法国的沃尔夫(F.T.Wulf)在巴黎 300 米高的艾弗尔塔顶上进行实验，比较塔顶和地面两种情况下残余电离的强度，得到的结果是塔顶约为地面的 64%，比他预计的 10%要高。他认为可能在大气上层有γ源，也可能是γ射线的吸收比预期的小。

1910—1911 年，哥克尔(A.Gockel)在瑞士的朱尼黑(Zurich)让气球把电离室带到 4500 米高处，记录下几个不同高度的放电速率。他的结论是：“辐射随高度的增加而降低的现象……比以前观测到的还要显著。”

人们对这一反常辐射的来源议论纷纷莫衷一是，但占上风的还是来源于地上的看法。

11.5.2 赫斯发现宇宙射线

奥地利物理学家赫斯(VictorFranzHess，1883—1964)正好是一位气球飞行的业余爱好者。他设计了一套装置，吊在气球下，里面主要是一只密闭的游离室，壁厚足以抗一个大气压的压差，静电计的指示经过温度补偿，直接记录。他一共制作了十只侦察气球，每只都装载有 2—3 台能同时工作的游离室。

1911 年，第一只气球升至 1070 米高，结果是在那一高度以下，辐射与海平面差不多。翌年，气球达到 5350 米，得到精确的结果是：起初游离电流略有下降，800 米以上似乎略有增加，在 1400—2500 米之间显然超过海平面的值，到 5000 米已数倍于地面。

赫斯在 1912 年在《物理学杂志》发表题为《在 7 个自由气球飞行中的贯穿辐射》的论文，结尾写道：

“这里给出的观测结果所反映的新发现，可以用下列假设作出最好的解释。即假设强大穿透力的辐射是从外界进入大气的，并且甚至在大气底层的计数器（指游离室）中都会产生游离。辐射的强度似乎每小时都在变化。由于我在日蚀时或在晚间进行气球放飞都未发现辐射减少，所以我们很难考虑太阳是辐射的来源。”

1914 年，德国物理学家柯尔霍斯特(W. Kolh Örster)将气球升至

9300 米，游离电流竟比海平面大 50 倍，确证赫斯的判断。

赫斯的发现引起了人们的极大兴趣，开始对宇宙射线的各种效应和起源问题进行了广泛的研究。

11.5.3 安德逊发现正电子

安德逊(Carl David Anderson， 1905—) 是美国加州理工学院物理教授密立根的学生，从 1930 年开始跟密立根做宇宙射线的研究工作。尽管密立根对宇宙射线的起源的见解后来证明是错误的，但他和他的学生们在宇宙射线的研究方面作出过许多贡献，发展了观测宇宙射线的各种实验技术，组织过多次科学考察。安德逊 1930 年起就负责用云室观测宇宙射线。云室置于磁场中。为了鉴别粒子的性质，在云室中安有几块金属板，粒子穿过金属板，就可以区别其能量。1932 年 8 月 2 日，安德逊在照片中发现一条奇特的径迹，与电子的径迹相似，却又具相反的方向，显示这是某种带正电的粒子。从曲率判断，又不可能是质子。于是他果断地得出结论，这是带正电的电子。当时安德逊并不了解狄拉克的电子理论，更不知道他已经预言过正电子存在的可能性。

狄拉克是在他的相对论电子理论中作出这一预言的。从他的方程式可以看出，电子不仅应具有正的能态，而且也应具有负能态。他认为这些负能态通常被占满，偶而有一个态空出来，形成“空穴”，他写道：“如果存在空穴，则将是一种新的，对实验物理学来说还是未知的粒子，其质量与电子相同，电荷也与电子相等，但符号不同。我们可以称之为反电子。”他还预言：“可以假定，质子也会有它自己的负态。……其中未占满的状态表现为一个反质子。”关于反质子的预言，到 1945 年才由西格雷(Emilio Segrè)证实。

关于正电子产生的机理，安德逊解释错了。他认为，初级宇宙射线撞击到核内的一个中子，会使中子分裂成为正电子和负质子。为此，他还建议实验家寻找这种“负质子”。稍晚才由布拉开特和奥基亚利尼(G.Occhialini)从簇射现象的观测搞清正电子产生的机理。他们用盖革计数器自动控制云室，首次看到了正负电子对的产生。他们正确地解释簇射现象是由于 γ 射线从原子核近旁通过时，转化为正、负电子对，同时又有更多的 γ 射线产生，从而产生雪崩现象。

由于发现宇宙射线和正电子的功绩，赫斯和安德逊共享 1936 年诺贝尔物理奖，而布拉开特因改进云室技术和由此作出有关核物理和宇宙射线的一系列新发现而获 1948 年诺贝尔物理奖。

正电子的发现，对研究光与实物之间的转变有重要意义，使人们对“基本粒子”的认识有了一次质的飞跃。

§11.6.6 中子的发现

核物理学在 20 世纪 20 年代经历了一个低潮时期，似乎没有很多惊人的发现，但却酝酿着新的萌芽。到了 30 年代初期，一下子都涌现了出来。正电子是一例，氘是一例，人工放射性又是一例。而中子的发现，影响最为深远，因为从此对核的结构有了更正确的了解，为建立核理论奠定了基础。同时，利用中子作为入射粒子，为进一步探索核反应的规律找到了更有力的武器。中子的发现是核物理学发展中的一项重大事件，有必要比较详细地介绍其经过。

11.6.1 早期设想

1920 年以前，人们根据积累的事实，普遍认为原子核是由质子和电子组成的。这种观念既包含了 1815 年普劳特(Prout)关于一切元素的原子都由氢原子构成的假说，又解释了汤姆逊和阿斯通用质谱仪作出的新发现。但是新的矛盾也出现了，莫塞莱精确建立了核电荷数 Z 与原子序数的恒等关系,证明质子数与电子数不可能相等,这就促使卢瑟福在 1920 年提出大胆的，却是经过深思熟虑的新假说。他在 1920 年的一次演讲中阐述了如下的思想[①]：

“在某些情况下，也许有可能由一个电子更加紧密地与 H 核结合在一起，组成一种中性的双子。这样的原子也许有很新颖的特性。除非特别靠近原子核，它的外场也许实际为零。结果就会使它有可能自由地穿透物质。它的存在也许很难用光谱仪进行检测。也许不可能把它禁闭在密封的容器里。换句话说，它应很容易进入原子结构内部，或者与核结合在一起，或者被核的强场所分解。……”

“要解释重元素核的组成，这种原子的存在看来几乎是必需的。”

这就是著名的卢瑟福中子假说。

11.6.2 持续的探索

为了检验卢瑟福的假说，卡文迪什实验室从 1921 年起就开始了实验工作。卢瑟福的早年学生和得力助手查德威克目标明确、坚持不懈地进行探索，历经 11 年，终于在 1932 年找到了确实的证据。

1921 年的实验是格拉森(J.L.Glasson)和罗伯兹(J.K.Roberts)在查德威克的帮助下做的。他们试图在氢气的放电中找到这种贯穿力极强的辐射，但没有成功。1923 年查德威克用盖革发明的点计数器进行测量也无效果。

1924 年，查德威克在一封给卢瑟福的信中写道：“我想，我们应对中子作一番认真的研究。我相信我已有了一个可以付诸行动的计划。……”他建议用 200000 伏来加速质子，因为在强电场中中子可能形成或存在，而用快速质子打入原子，也许能找到一些证据。但是事与愿违，他只能用忒斯拉(Tesla)线圈产生的高压来进行实验。

[①] E.Rutherford, Proc. Roy.Soc.A 97(1920) p.374.

1929 年，卢瑟福和查德威克在《剑桥哲学会刊》上汇报了以前采用过的各种方法，并讨论了寻找中子的可能方案。他们寄希望于在人工转变实验中不发射质子的某些元素，认为也许会有不受磁场偏转的辐射引起微弱的闪烁。

他们对铍特别感兴趣，因为铍在α粒子轰击下是不发射质子的；据说，铍矿往往含有大量的氦，也许铍核在辐射的作用下，会分裂成两个α粒子和一个中子。

查德威克安排他的学生继续对铍进行辐照，做了大量实验。实验曾一度出现有利的证据，但由于放射源（钋）不够强，信号太弱，无法作出判断。

1930 年，当他们有了比较强的钋源和用放大线路增强灵敏度的计数装置后，德国人玻特(W.Bothe)已经率先发表了用钋α轰击铍的实验结果。

11.6.3　错误的判断

玻特曾在盖革的研究所工作，研究盖革计数器，并用之于探测微观粒子，对核物理研究方法的改进作出过贡献。从 1928 年起，玻特和他的学生贝克尔(H.Becker)用钋的α粒子轰击一系列轻元素，发现α粒子轰击铍时，会使铍发射穿透能力极强的中性射线，其强度比其它元素所得大过 10 倍，穿透力比γ射线大得多。他们认为这种贯穿辐射是穿透力更强的γ射线。

在巴黎，居里实验室的约里奥–居里(Joliot–Curie)夫妇也正在进行类似实验，很快就证实了玻特的结果。他们虽然尚未采用电子学方法，但却拥有比别人强得多的放射源。他们将含氢的石蜡置于铍辐射源的游离室之间，发现计数大增，显然，石蜡又发出了一种更强的射线。用磁场可使石蜡发出的射线产生微小偏转。经过比较，证明这一射线是质子流，速度很高。他们和玻特一样，把铍辐射看成γ射线，认为质子流的产生是γ粒子撞击氢离子的结果，是类似于康普顿效应的某种特殊现象。就这样，玻特和约里奥–居里夫妇都错过了发现中子的机会。约里奥–居里夫妇后来讲，如果他们读过并且领会 1920 年卢瑟福的演讲，肯定会对这个实验的意义有正确的理解。

11.6.4　查德威克发现中子

约里奥–居里夫妇的失误还在于他们没有认真核算高速质子的动量和能量是如此之大，靠γ粒子撞击而作反冲运动，是否符合动量守恒和能量守恒。据查德威克回忆，当他读到约里奥–居里报导铍辐射的惊人特性的那一篇文章时，他把约里奥–居里的看法告诉了卢瑟福。卢瑟福喊道：“我不相信。”他不相信这是康普顿效应，很可能这里出现了多年寻找的中子！

查德威克用准备好的钋源和新的探测仪器，经过几天紧张的实验，

复核了玻特和约里奥–居里的结果。1932 年 2 月 17 日，查德威克给《自然》杂志写了一篇通信，题为《中子可能存在》，这时离约里奥–居里夫妇的论文发表不到一个月。

接着，查德威克在《英国皇家学会通报》上发表了题为《中子的存在》一文，详细报告了实验结果及理论分析。他首先证明高速质子流并非来自石蜡一类的含氢成分，因为即使不含氢的材料也会产生高速质子流，其中必有蜕变过程。再用吸收法测质子的能量，测量约为 5.7MeV。根据能量守恒定律推算，铍辐射如果是γ射线，γ光子应具有能量 55MeV。用同样的铍辐射轰击氮，推算氮原子的反冲能量最大为 0.45MeV。但实验得到的却是 1.2MeV 不满足能量守恒定律。查德威克在论文中写道[①]：

“显然，在这些碰撞过程中，我们要么放弃应用能量与动量守恒，要么采用另一个关于辐射本性的假设。如果我们假设这一辐射不是量子辐射（即γ光子）而是质量与质子几乎相等的粒子，所有这些与碰撞有关的困难都会消除。”

查德威克进一步用云室方法测定中子的质量，结果是与质子的质量非常接近。再根据质谱仪的数据推算，得到中子质量的精确值为 1.0067 原子质量单位。各方面的事实确凿证明了中子的存在。

查德威克这样快就取得如此全面的结果，当然是跟有准备的实验研究有关系，也和卡文迪什实验室整个集体的支持分不开。卢瑟福自不待说，其他成员，包括年轻的研究生和来自各地的研究人员也大力相助，发挥了集体的智慧和力量。当时，卢瑟福的亲密同事，苏联物理学家卡皮查曾组织过一个“俱乐部”，每周定期聚会，交谈工作中的问题和体会。查德威克有关中子的设想也常向与会者报告。所以在卡文迪什实验室里大家对中子的存在早已没有怀疑。大家从各个角度协助查德威克寻找中子的证据，这就大大促进了中子实验的进程，使查德威克迅速由“中子可能存在”转变为“中子肯定存在。”

11.6.5 中子发现以后

中子的发现引起一系列的后果，主要有三方面：第一是为核模型理论提供了重要依据，从此核物理学进入了一个崭新的阶段；其次是激发了一系列新课题的研究，引起一连串的新发现，其中最重要的是：人工放射性、慢中子和核裂变；第三是打开了核能实际应用的大门。

中子的发现证实了卢瑟福的判断，原子核中有中性粒子，然而这种中性粒子并不是卢瑟福想像的那样，是质子和电子复合组成的双子，它也不能转变为质子和电子，而是一种稳定的粒子。于是代替原先质子–电子核模型的，是质子–中子核模型。

[①] J.Chadwick, Proc.Roy.Soc.(London) A136(1932) p.692.

其实在中子发现以前，就有一位意大利物理学家叫马觉朗拉(Majorana)的，有过这个想法，不过当时文章没有发表，因为他觉得还不太有把握。

1932 年 4 月 21 日，在查德威克的通信发表后不久，伊万年科(Д.Д.ИBaHeHKo,1904—)向《自然》杂志提交一份极短的评论，提出“电子不可能以独立的粒子存在于核中，核仅仅由质子和中子组成。”早在 1930 年，他就和安巴祖米安(Ambarzumian)在《法国科学院学报》联名发表过电子不可能在核中存身的思想。

1932 年 6 月，海森伯也提出类似的思想。他针对核的组成写了一系列论文，为以后建立核的各种模型奠定了理论基础。

§11.7　加速器的发明与建造

核物理学的发展和加速器有密切的关系。因为有了加速器，人们就可以得到比天然放射性（包括宇宙射线在内）种类更多、能量更高、更便于控制的各种粒子，以从事各种试验。从 30 年代开始，由于加速器的发明和建造，物理学转入了大规模集体研究的轨道，物理学家越来越多地参加有组织的研究工作，实验室的规模越来越大，物理学与技术的关系越来越密切。这意味着人类开始以更积极的方式变革自然、探索自然、开发自然和更充分地利用大自然的潜力。

11.7.1　人工加速带电粒子的各种尝试

1919 年，卢瑟福宣称，如果粒子有更大的能量，就有希望击破更多元素的核。人们开始认识到，利用实验条件加速粒子，向各种原子轰击，是进一步实现核转变的关键所在。大约在 1925 年，美国的布赖特（G.Breit）、托夫（M.Tuve）和达耳（O.Dahl）首先进行了一项试验。他们建造了一个可以产生几百万伏高压的变压器（忒斯拉线圈），并且把这一电压加在可用于加速粒子的管道上。不过他们并没有实现核反应。不久，柏林的布拉什(A.Brasch)和兰格(F.Lange)利用脉冲发生器加速质子。1928 年，布拉什企图利用大气电，将它接到放电管，希望能引起核转变。指导最初几次大气高压电实验的乌尔班(C.Urban)竟因遭闪电袭击而丧生。他们的尝试证明是不成功的。

1925 年，美国的索伦森(R.W.Sorensen)发明了多级变压器，劳里参(C.C.Lauritsen)和他的助手们用之于放电管的加速电极。后来，克朗内(H.R.Crane)从放电管获得了高强度 X 射线和质子流。

早在 1890 年，开尔文勋爵就提出过，可以利用电荷分布于导体表面的原理得到高电压。1931 年，美国普林斯顿大学的范德格拉夫(R.J.van deGraaf)采用在绝缘的金属球中心连续地供给电荷的方法，发明了一种能够有稳定输出的高压发生器，电压达 1500 千伏。这种高压装置成功地

用于加速带电粒子，在后来的核物理和高能粒子的研究中发挥了作用。

1930 年卡文迪什实验室里的考克拉夫特(J.D.Cockcroft)和沃尔顿(E.T.S.Walton)发展了瑞士人格雷纳切(H.Greinacher)的电压倍加方法，用之于加速质子。这件工作当然受到他们的导师卢瑟福的支持和鼓励。1932 年，他们用 770 千伏电压获得了锂分裂为两个α粒子的核转变。

然而，所有上述试验都要受到高电压的限制，因为粒子的能量都是从高电压直接获得的。例如：能量为 1MeV 的质子，电压必须加高到 1 兆伏。这样高的电压在绝缘上会有极大的困难。因此，人们早就想利用较低的电压，使粒子加速到高能量。

11.7.2 劳伦斯发明回旋加速器

劳伦斯(ErnestLawrence,1901—1958)是美国伯克利加州大学教授，很早就选定了核物理学作为自己的科研方向。1929 年，正当他苦思如何利用低电压获得高能粒子之际，一篇讨论正离子多级加速的论文吸引了他，使他想到让正离子在磁场的作用下，在两个半圆形电极之间进行回旋运动，从而得到加速的方法。他不仅提出了巧妙的方法，更为重要的是以不懈的努力实现了自己的方案。

1930 年春，劳伦斯让他的研究生爱德勒夫森(NelsEdlefson)做了两个结构相当简陋的回旋加速器模型。真空室只有 10.16 厘米的直径，其中之一居然显示出了使离子回旋加速的效果。

1931 年，他又让利文斯顿(M.S.Livingston)做一微型回旋加速器，直径（指真空室）11.43 厘米，在两 D 形电极上加不到 1 千伏电压，竟得到了 8 万伏的加速效果。

1932 年，劳伦斯继续试验。新的装置使质子加速到 1.25MeV，并且很容易地就检验了考克拉夫特和沃尔顿的锂转变，显示了回旋加速器的优越性。这个新的回旋加速器直径只有 27.94 厘米。

接着，劳论斯用 D 形电极直径为 68.58 厘米的回旋加速器加速氘核，取得更佳效果。因为氘核是由一个质子和一个中子组成的复合核，氘核在强电场作用下会解体为质子和中子，而中子的穿透力特别强，所以用氘核作入射粒子，可以实现许多新的人工核反应。

1934 年，约里奥–居里夫妇发现人工放射性的消息传来，劳伦斯随即用回旋加速器获得了多种放射性同位素，提供给医生、生物化学家、农业和工程科学家进行同位素应用，取得了显著成果。

本来，劳伦斯是可以用回旋加速器在约里奥– 居里夫妇之前发现人工放射性的，大概由于当时用于观测的盖革计数器本底较大而且没有规律，因此错过了这个机会。

11.7.3 大规模研究的丰硕成果

1936 年，在劳伦斯的主持下，伯克利的 68.58 厘米回旋加速器改装成 0.94 米，使粒子能量达 6MeV，用它测量了中子的磁矩，并且产生了第

一个人造元素——锝(Tc)。

1939 年，大型的 1.52 米回旋加速器问世。用这台仪器发现了一系列超铀元素。

战后，劳伦斯的合作者麦克米兰(E. M. McMillan)提出用同步方法进行稳相可以使回旋加速器的能量大为提高，于是又设计了一台 4．67 米电子同步加速器，1949 年建成。质子同步加速器于 1954 年完工，能量接近 6.4GeV，用它产生了质子–反质子对。

一台现代化的加速器相当于一座规模庞大的工厂，需要大量工程技术人员、实验家和理论家协同工作。正如劳伦斯在他的诺贝尔物理奖领奖词中说的：“从工作一开始就要靠许多实验室中的众多能干而积极的合作者的集体努力，”“各方面的人才都参加到这项工作中来，不论从那个方面来衡量，取得的成功都依赖于密切和有效的合作。”[①]

§11.8 人工放射性的发现

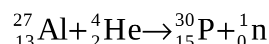
我们还记得，在世纪之初曾“发现”过感生放射性后来证明是在核衰变过程中放射性物质转变为射气，随空气散逸在周围，有的就附着在器皿上，因此误认为周围的物体感应产生了放射性。可是，真正的“感生”放射性到 30 年代又被发现了，这是法国的约里奥–居里夫妇作出的又一贡献。

1933 年，约里奥–居里夫妇在第七届索尔威会议上报告，某些物质在α粒子轰击下发射出正电子连续谱。他们一直坚持研究这个现象，于 1934 年 1 月 19 日作了结论，并向《自然》杂志写了一则通信，里面写道：

“我们最近的一些实验显示出了一个十分令人惊奇的事实。铝箔放在钋制品上受到辐射，如果该放射性制品移走，正电子的发射并不立即停止。铝箔保持有放射性，并且这种放射性的辐射也和一般放射性元素一样，作指数衰减。对于硼和镁，我们也观察到了同类现象。”

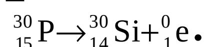
“当我们把辐照过的铝箔溶于盐酸中，放射性就以气态跟随氢气逸走了，还可以收集在管中。化学反应必定是形成了氢化磷(PH_3)或氢化硅(SiH_4)”[①]。

写成反应式，就是：



$$^{27}_{13}Al+^{4}_{2}He\rightarrow^{30}_{15}P+^{1}_{0}n$$

磷 30 不稳定，继续转变为硅 30：



$$^{30}_{15}P\rightarrow^{30}_{14}Si+^{0}_{1}e.$$

人工放射性的发现，为人类开辟了一个新领域，开阔了放射性同位素的应用。从此，科学家不必再只依靠自然界的天然放射性物质来研究

[①] Nobel Lectures： Physics, 1922—1941， Elsevier(1965) p.430

[①] F.Joliot and I. Curie, Nature, 133(1934)p.201

问题，这也大大推动了核物理学的研究速度。

§11.9　重核裂变的发现

人工放射性引起的重要事件是重核裂变的发现，但是人们对重核裂变的认识却有一个曲折过程。

11.9.1　费米的中子实验

费米(EnricoFermi,1901—1954)是意大利物理学家，1926 年时只有 25 岁，就当上了罗马大学理论物理学教授。1927 年曾提出一种统计理论（即费米–狄拉克统计），在微观世界有广泛运用，是核物理学的理论基础之一。1933 年，费米提出β衰变理论。在国际上享有很高声望，国内成了意大利振兴物理学的中坚人物。由于他的努力，罗马在 30 年代成了世界上又一个物理学研究中心。

1934 年约里奥–居里发现人工放射性的消息传到罗马，使费米想到用中子作为入射粒子要比α粒子有效得多。这个想法实际上早在 1920 年卢瑟福就提出过。费米预计到，困难在于中子不会自发地由物质发射出来，还要靠α粒子轰击某些元素。例如铍，这个过程只有十万分之一的几率，即十万个α粒子才能激发一个中子。这样低的效率，当然很难保证一定成功。正好这时费米的理论工作有一段空闲，他决心亲自试试。因为只有实践才能取得第一手资料。

费米周围有一批合作者，例如：西格雷(E.Segrè)、阿玛尔迪(E.Amaldi)、拉塞第(F.Rasetti)，后来还有达哥斯廷诺(O.D'Agostino)。他们大多是实验家。费米在他们的协助下，且镭射气和铍作为中子源，按着周期表的顺序依次轰击各种元素。他的目的显然是要检测中子作入射粒子的有效性，以及在中子轰击下产生放射性的可能性。1934 年 3 月 25 日寄出了第一篇通信，报导在轻元素中获得了人工放射性，其中包括氟和铝。

费米小组继续进行实验，他们用中子辐照了 68 种元素，其中有 47 种产生了新的放射性产物。

费米原来想尽快结束实验，以便继续他的理论工作。那里知道竟出现了意想不到的事情，使费米小组作出了更大的发现。

11.9.2　是“超铀元素”吗？

1934 年夏天来到之前，费米小组依顺序用中子轰击当时所知的最重元素——铀■U，得到了半衰期为 13 分钟的一种放射性产物。经过分析，测出这种产物的化学性质，发现它不属于从铅到铀之间的那些重元素。这个结果和用中子轰击其它重元素不一样，使费米等人大为惊异。其实，这就是最早出现的重核裂变现象。不过，从费米当时掌握的实验证据，难以作出这一判断，他们也不可能想到这种可能性。1934 年 5 月，费米

以《原子序数高于 92 的元素可能生成》为题，在《自然》杂志上发表这一信息，文中写道[①]：

“13 分钟的放射性与很多重元素等同的否定证据，提示了这样的可能性：元素的原子序数也许大于 92。如果它是 93 号元素，它应在化学上与锰及铼类似。这一假设在某种程度上还得到下列事实的支持：不溶于盐酸溶液的硫化铼可以携带着 13 分钟放射物沉淀下来。”

如果真是 93 号元素，那确是一件大事。大于 92 号的元素就叫做超铀元素。不过，费米并未作定论。可是这件事被意大利当时的法西斯政权利用，大肆宣传是法西斯主义在文化领域里的胜利。费米对此极为不满，郑重声明，尚须作若干精密实验，才能肯定 93 号元素的生成。

这个问题历经 4—5 年还没有查清楚,却有更多的事实对“超铀元素”的假说有利。欧洲好几个研究机构，特别是巴黎的居里实验室和柏林大学的化学研究所都肯定了费米的实验，甚至后来还陆续“发现”了 94 号、95 号、96 号以至 97 号元素。“超铀元素”的说法已经得到科学界的公认。某些教科书把它当作“新成就”列入教材，甚至 1938 年费米获诺贝尔物理奖时还把超铀元素的生成作为他的主要功绩之一。只有一位德国的女化学家,叫诺达克(F.Nod–dack)在 1934 年 9 月对费米的超铀元素假说表示怀疑，发表文章说：“可以想象，当重核被中子轰击时，该核可能分裂成几大块，这些裂片无疑将是已知元素的同位素，而不是被辐照元素的近邻。”但是她也只是一种猜测，既没有亲自动手做实验，也没有认真分析他人的结果。

后来判断，费米 1934 年的铀实验结果是很复杂的，确也含有超铀元素的成分，不过费米测量的不是这一部分。

11.9.3　发现慢中子的作用

1934 年 10 月，费米小组又发现一新奇现象。阿玛尔迪等人正在辐照一块银制圆筒，圆筒中间是中子源，整个装置又放在防护用的铅盒内。他们发现，银的放射性随装置在铅盒中的位置而变动。鉴于铅是重元素，费米建议他们用质轻的材料，例如石腊试试。他们把大块石腊挖了个洞，把中子源放在里面，然后辐照银圆筒，没有想到，由于石腊的在场，银的放射性竟增大了百倍。再放到水下实验，证实水也有类似的作用。费米即时对这个现象作了解释，认为是氢核（即质子）与中子的质量相近，由于它的在场，中子碰撞后速度大大减慢。速度低，被原子核俘获的机会增多，因此放射性的生成也就大大增加。

认识到慢中子的作用，对重核裂变的发现提供了重要前提，因为这就大大增强了中子轰击的效果。

11.9.4　接近于成功

[①] E.Fermi, Nature, 133(1934) p.898.

1937 年，伊伦·居里和沙维奇(P.Savitch)在用中子辐射铀盐时，发现一新现象，分离出来一种半衰期为 3.5 小时的成分，其化学性质很像镧。镧是稀土族元素中的第一名，原子序数为 57，与它化学性质相近的重元素是锕 $_{89}$Ac。他们先判断 3.5 小时放射物为锕，但进一步追踪，当用结晶分离法分离出锕时，出乎意料，3.5 小时的放射性却不在锕中，镧的放射性倒反而加强了。本来他们已经接近于铀核分裂的结论，可是他们却没有迈出这关键的一步。在 1938 年 5 月的《科学院通讯》上，他们写道：

“用快中子或慢中子辐照的铀中，产生了一种放射性元素，半衰期为 3.5 小时，其化学特性很像镧。……它或许也是一种超铀物质，但我们暂时还未确定其原子序数。”

后来查明，在他们的铀裂变产生的碎片中，还有一种元素，叫钇(Y)，其半衰期也正好是 3.5 小时，居里小组没有能够完全把 3.5 小时的放射性分离出来，所以无法作出准确的判断。

11.9.5　哈恩作出精确分析

哈恩（Otto Hahn，1879—1968）是德国化学家，早年曾随卢瑟福和拉姆塞（W.Ramsay）从事放射性研究，发现过射钍和射锕。1907 年，在柏林大学化学研究所工作。女物理学家迈特纳（LiseMeitner，1878—1968）和他在那里开始了长期合作，1917 年共同发现镤。

迈特纳是犹太血统的奥地利人，由于种族迫害，在他们的研究到了最关键的 1938 年，被迫离开德国。

不久，伊伦·居里和沙维奇报导镧出现的文章传到哈恩这里。他认为没有可能，一定是居里和沙维奇搞错了，就和助手斯特拉斯曼（F.Strassmann）立即重复居里的实验。

他们用慢中子轰击铀。经过一系列精细的实验在铀的生成物中找到一种放射性物质，其放射性的半衰期为 4 小时，接近 3.5 小时，不过，化学性质却与镧不同，而与钡类似。但是钡的原子序数是 56，与镭同一族。他们想也许这是镭的一种尚未发现的同位素。可是，费尽心机也无法从钡中分离出那种放射性的“镭”，它总是伴随作为载体的钡沉淀。他们只好承认它就是钡。后来又经过多次实验，证实了伊论·居里和沙维奇的结果，确有镧的生成。也就是说，他们从化学分析得到的结果，无可辩驳地肯定了中间化学元素（镧和钡）的出现。

哈恩对这件事情实在无法理解，他如实地报导了实验结果。1939 年 1 月德国的《自然科学》杂志发表了哈恩和斯特拉斯曼的论文。在结尾中，他们写道[1]：

“作为化学家，我们真正应将符号 Ba、La、Ce 引进衰变表中来代替

[1] 转引自：H.G.Graetzer, D.L.Anderson,The Discovery of Nuclear Fission, Reinhold(1971)p.47

Ra、Ac、Th，但作为工作与物理领域密切相关的‘核化学家’，我们又不能让自己采取如此剧烈的步骤来与核物理学迄今所有的经验相抗庭。也许一系列巧合给了我们假象。”

11.9.6 肯定了裂变

上述这篇论文还未发表，哈恩就写信告诉了正在斯德哥尔摩诺贝尔研究所工作的迈特纳。她有一个侄子，叫弗利胥（Otto Frisch）也是物理学家，1934 年流亡到国外，在玻尔的理论物理研究所工作。他们利用圣诞节假到瑞典南部会面，自然就要对哈恩的结果讨论一番。弗利胥起初对哈恩的结果表示怀疑，但迈特纳坚信哈恩工作严谨，不可能有错。在争论中，弗利胥想起了玻尔不久前提出的“液滴核模型”。这个模型是说，在某些情况下，可以把核想象成液滴，核子（质子和中子）就像真正的水分子。强相互作用造成的“表面张力”使核平常保持球形，但在外来能量的作用下，“液滴”也可能由于振动而拉长。他们想，如果这时被中子击中，也许会以巨大的能量分裂。

几天后，弗利胥回到哥本哈根，正值玻尔准备离开去美国。弗利胥告诉他哈恩的化学结论和自己跟迈特纳的看法。玻尔听了十分高兴，惊呼：“正应该如此。”

重核裂变的现象终于真相大白。弗利胥和迈特纳随即联名写文论证重核裂变的产生。“裂变”（fission）一词就是他们提出来的。

玻尔将重核裂变的新进展向华盛顿的第五届理论物理讨论会作了汇报。正好费米也参加了这个会议。与会者对这个问题极感兴趣。就在会议期间，华盛顿卡尔内奇（Carnegie）学院、约翰·霍普金斯大学、哥伦比亚大学都分别证实了这一现象。

11.9.7 重核裂变的实验验证

重核裂变是首先用化学方法作出发现的，人们也许要问，为什么在这以前没有人用物理方法对这一现象进行探索？难道实验者没有机会碰到发现裂变的机遇吗？

其实，在 1938 年就有一位德国物理学家，名叫德罗斯特（G.v.Droste），他在用游离室观测铀和钍在中子轰击下所产生的α粒子时，就有机会观测到裂变。当时他为了防止铀和钍的天然放射性所发射的α射线干扰实验，特意在铀和钍上仔细覆盖了一层很薄的金属箔。这层箔正好有效地隔绝了可能出现的裂变碎片。因为裂变碎片比他要找的α粒子大得多，带有更多的电荷，所以在金属箔中的行程也短得多。德罗斯特由于过分的细心，反而失去了发现核裂变的机会。归根到底，还是因为他没有往裂变的方向去想。可见，没有正确的物理思想作为指导，实验者常常会迷失方向。

当然，重核裂变之所以首先在核化学领域中得到发现，还是应归功于化学分析的高度精确性，当时物理手段还很难达到这一水平。

不过，认识到了重核裂变的可能性，在人们精心设计的条件下，用物理实验方法验证重核裂变的发生还是很简便的。当时用物理方法研究重核裂变现象的途径大致有四种：

1.用游离室记录裂变后产生的带电碎片所引起的巨大电脉冲。铀在正常辐射中发出的α和β粒子也会引起游离室游离，但比起裂变碎片来要小得多。所以，当中子源（例如：镭和铍在一起）靠近铀时，就有可能从示波器观测到裂变现象。哥伦比亚大学用的就是这种方法。

其实，（后来才知道）最先是哥本哈根的弗利胥用游离室观测到了重核裂变。不过，他不是用电子示波器，而是用机械示波仪。他在发表“裂变”之后不久，就作出了这个实验。

2.迈特纳曾建议：取一块金属板置于铀层附近用中子轰击铀使之裂变，有可能在金属板上残留下轻元素的原子。美国加州贝克利分校的麦克米伦（E.McMillan）采用了她的方案。具体做法如图 11–4。在纸板上涂一层极薄的铀，靠着纸板平行地放着一叠铝箔，暴露在回旋加速器的中子源前，然后分别测量各片铝箔的放射性。经两小时的轰击后，测量所得曲线如图 11–5。

■图 11–4 裂变片沉积在各层铝箔上

法国的约里奥也用这一方法观测到了裂变现象。

3.用威尔逊云室直接观测，可以把裂变碎片的径迹拍成照片。加州大学的考尔松（D.R.Corson）和邵恩通（R.L.Thornton）1939 年 2 月用这一方法观察到了铀核裂变。他们把 UO_3 涂在胶棉薄膜上，和中子源一起放在云室中。885 张照片中有 25 例显示两根重粒子径迹，从薄膜的同一点沿相反方向反冲。

4.用 X 射线标识谱分析技术。这个方法是从莫塞莱在 1914 年创立起就用于鉴别元素的内层结构，对于检验元素的周期性，起过重要作用。从 1938 年起，加州大学的阿贝尔森（P.Abelson）用这个方法鉴别铀受中子辐照后的生成物。他的目的是要经 X 射线标识谱来确定半衰期为 72 小时的一种未知的“超铀元素”。如果真是超铀元素，其 K 谱系谱线波长相应的能量应比铀的高。可是实验结果却低得多。这本来足以证明生成物不是超铀元素，而是某种中间元素。可是阿贝尔森并不死心，而是准备试着把这一谱线归属于 L 谱系。他正在为难之际，裂变被发现了，他得知这一消息，马上明白了自己遇到困难的原因。他发现，原来他的生成物是 53 号元素碘的同位素。于是他的工作成了重核裂变又一个有力的实验验证。从这一事例可以说明，只要认真做下去，即使没有核化学的发现在前，物理学家迟早总会用物理方法直接观测到重核裂变的。当然，观念的改变越早，这项工作的进程就会越顺利。

■图 11–5 铀裂变碎片引起的放射性曲线

§11.10 链式反应

重核裂变一经证实，人们立即转向由此可能释放的核能。许多实验证实了理论预期的能量，但是要利用这一巨大的能源，必要的条件是有可能产生自持的链式反应。

1939 年 3 月间，约里奥所在的巴黎核化学实验室，费米所在的哥伦比亚大学和西纳德（L.Szilard）所在的纽约大学同时对这项研究作出了贡献。

约里奥和他的同事首先提出了“中子过剩”问题。比较核的组成可以发现，轻核一般是质子和中子数量近于相等，中等大小的核往往中子数略大于质子数，而重核则中子数较质子数大得多。于是在重核分裂为两个较轻的核时，必然出现中子过剩的情况。如果过剩的中子又去轰击别的重核，不就可以出现连锁反应了吗？

然而，事情并不如此简单。多余的中子会不会被吸收？会不会转变为质子？有没有可能出现连锁反应？唯一的答案只能依靠实验。

约里奥的实验是用镝（$_{66}Dy$）探测器测量两种溶液中慢中子的密度分布。一种是硝酸铵，一种是硝酸铀酰。测量距中子源（镭+铍）不同距离处的中子密度。实验证明由于铀的存在，在一段距离之外，中子密度比没有铀的情况大些，有可能产生链式反应。

费米小组证明铀核每次裂变产生的中子平均数可能是 2,他们选择铀 235 和石墨作试验。在美国军方的支持下，开始了曼哈顿（Manhattan）工程。这实际上是一座试验性的原子反应堆。

这一工程是 1941 年 12 月开始的。费米选了芝加哥大学的一座运动场的看台下的网球场作为试验区。他和一大批物理学家以及工程技术人员研究了各种设计方案。他们认为，要实现自持的链式反应，必须解决两个问题。一是要找到合适的减速剂，把快中子变为慢中子，才能有效地激发核裂变；重水（即 D_2O）虽然效果好，但不易制备，成本太高。普通水（即 H_2O）也可以充当减速剂，但又减速太快，甚至还有很强的吸收效应，所以也不能用。费米建议用石墨。为此他和同事们做了大量实验，研究石墨的吸收中子和慢化中子的特性。另一个问题是必须严格控制裂变反应的速率，使裂变既能不断进行，又不致引起爆炸。他们利用镉吸收中子的特性，把镉棒插入反应堆，通过调节镉棒深度，来控制裂变反应的速率。后来又想出把反应堆设计成立方点阵的方案，铀层和石墨层间隔地布置在方阵中。

1942 年 12 月 1 日,最后一层石墨和铀砖砌好,反应堆已达临界状态。次日上午，抽出控制用的镉棒，果然产生了自持的链式反应。当时得到的功率仅有 0.5 瓦。但这却是人类第一次实现了原子能的可控释放。从此人类开始了原子能利用的新纪元。

§11.11　原子核模型理论

正如原子模型的建立是原子物理学史的重要组成部分一样，原子核模型的建立也是原子核物理学史的重要组成部分。模型是人类认识自然的必要途径，也是理论思维的一种方式。在物理学的研究中，往往是先提出恰当的模型，然后才能得出简明的运动规律，建立适宜的理论体系。恰当的模型，可以概括已知的事实，这些事实经一定的理论联系在一起，得到统一的解释，而建立在可靠事实基础上的理论进一步又能预言新的事实，指导人们作出新的发现。

然而，原子核模型的研究，比起原子模型来，经历了漫长得多的过程，至今仍在发展之中。几十年来，先后有好几种核模型被提出，它们从不同侧面反映了原子核的某些现象和某些性质，每种模型都只能解释一定范围内的实验事实，难以用同一种模型概括和解释全部实验事实。这反映原子核的复杂性，也反映了人们对原子核的认识还不很充分。下面略举几种最著名的核模型。

1.气体模型，是费米在 1932 年提出的，他把核子（中子和质子）看成是几乎没有相互作用的气体分子，把原子核简化为一个球体，核子在其中运动，遵守泡利不相容原理。每个核子受其余核子形成的总势场作用，就好象是在一势阱中。由于核子是费米子，原子核就可看成是费米气体，所以，对核内核子运动起约束作用的主要因素就是泡利不相容原理。但由于中子和质子有电荷差异，它们的核势阱的形状和深度都各不相同。

气体模型成功之处，在于它可以证明质子数和中子数相等的原子核最稳定。这一结论与事实相符。再有，用气体模型计算出的核势阱深度约为–50meV，与其它方法得到的结果接近。不过这一模型没有考虑核子之间的强相互作用，过于简单，难以解释后来发现的许多新事实。

2.液滴模型，是 N.玻尔和弗伦克尔（Я.И.ФренкеЛь）在 1935 年提出的。其事实根据有二，一是原子核每个核子的平均结合能几乎是一常数，即总结合能正比于核子数，显示了核力的饱和性，另一是原子核的体积正比于核子数，即核物质的密度也近似于一常数，显示了原子核的不可压缩性。这些性质都与液滴相似，所以把原子核看成是带电荷的理想液滴，提出液滴模型。

1936 年玻尔用这个模型计算核反应截面，由此说明了一些核现象。1939 年玻尔和惠勒在解释重核裂变时，又用上了液滴模型。

但是早期的液滴模型没有考虑核子运动，所以不能说明核的自旋等重要性质。后来加进某些新的自由度，液滴模型又有新的发展。

3.壳层模型，是迈耶（M.G.Mayer）夫人和简森（J.H.D.Jensen）在

1949 年各自独立提出的。在这之前，当有关原子核的实验事实不断积累时，1930 年后不久，就有人想到，原子核的结构可以借鉴于原子壳层的结构，因为自然界中存在一系列幻数核，即当质子数 Z 和中子数 N 分别等于下列数（称作幻数）之一：

2、8、20、28、50、82、126 时，

原子核特别稳定。这跟元素的周期性非常相似，而原子的壳层结构理论正是建立在周期性这一事实基础之上的。

然而，最初的尝试却是失败的，人们从核子的运动，求解薛定谔方程，却得不到与实验相等的幻数。再加上观念与壳层模型截然相反的液滴模型已取得相当成功，使得人们很自然地对壳层模型采取否定态度。

后来，支持幻数核存在的实验事实不断增加，而不论是气体模型还是液滴模型，都无法对这一事实作出解释。直到 1949 年，迈耶和简森由于在势阱中加入了自旋–轨道耦合项，终于成功地解释了幻数，并且计算出了与实验正好相符的结果。

壳层模型可以相当好地解释大多数核基态的自旋和宇称，对核的基态磁矩也可得到与实验大致相符的结果；但对电四极矩的预计与实验值相差甚大，对核能级之间的跃迁速率的计算也大大低于实验值，这些不足导致了核的集体模型的诞生。

4.集体模型也叫综合模型，是 1953 年由 A.玻尔（A.Bohr）和莫特尔逊（B.B.Mottelson）提出的。在他们之前，雷恩沃特（L.J.Rainwater）1950 年就曾指出：具有大的电四极矩的核素，其核不会是球形的，而是被价核子永久地变形了。因为原子核内大部分核子都在核心，核心也就占有大部分电荷，因此即使出现小的形变，也会导致产生相当大的四极矩。在这一思想的基础上，A.玻尔和莫特尔逊提出了集体模型。他们指出，不仅要考虑核子的单个运动，还要考虑到核子的集体运动。集体模型（综合模型）实际上是对原子核中单粒子运动和集体运动进行统一描写的一种唯象理论。

壳层模型和集体模型各有成功之处，把两种模型综合起来，可以更全面地解释各种原子核的实验事实。

§11.12 β衰变的研究和中微子的发现

随着原子物理和核物理的发展，本世纪 30 年代开始，从核物理又分出了一个分支，专门研究基本粒子的性质、运动和相互作用、相互转化的规律以及这些粒子的内部结构，这就是粒子物理学。由于新发现的粒子能量一般都很大，所以也称高能物理学。前面已经介绍过电子、质子、中子、正电子的发现，下面再介绍中微子等粒子的发现经过。粒子物理学在其发展过程中不断得到新发现的补充，构成了现代物理学的主干学

科之一。

11.12.1 中微子概念的提出

中微子概念的提出，与原子核的β衰变有直接联系。1914 年查德威克证明α射线和γ射线的能谱是分立的，α衰变和γ衰变中发射的粒子所带走的能量正好与原子核初态末态的能量差相等。然而，β射线的能谱却有明显的不同，是连续谱而不是分立谱。也就是说，β衰变放射出来的电子，能量从零到某一个最大值都有分布，可是，原子核的初态和末态能量都是稳定的非常分明的定值。衰变电子的能量竟会小于两态之间的差值。人们感到极为迷惑。那一部分能量到哪里去了？是什么原因造成β连续谱的呢？

物理学家对这个问题提出了不同的见解。例如，迈特纳曾认为，β射线通过原子核的强电场时会辐射一部分能量。但 1927 年埃利斯（C.D.Ellis）和伍斯特（W.A.Wooster）用量热学实验精确地测量这一辐射能量，并没有测到任何能量损失。这一结果曾促使 N.玻尔一度主张，有可能能量守恒只是在统计意义上成立，对每一次衰变并不一定成立。

泡利不相信在自然界中唯独β衰变过程能量不守恒。他在 1930 年提出：“只有假定在β衰变过程中，伴随每一个电子有一个轻的中性粒子（称之为中子）一起被发射出来，使中子和电子的能量之和为常数，才能解释连续β谱。”这里泡利所谓的“中子”，实际上是后来的中微子。他还指出：这种中微子的速度不同于光子，质量很轻，穿透力极强，因此很难探测到。

泡利的中微子假说提出后，不少人持怀疑态度。但费米不仅接受了这一假说，还在 1934 年进一步引出了弱相互作用的β衰变理论。

费米认为，正象光子是在原子或原子核从一个激发态跃迁到另一个激发态时产生的那样，电子和中微子是在β衰变中产生的。他指出，β^-衰变的本质是核内一个中子变为质子，β^+衰变是一个质子变为中子。中子与质子可以看成是核子的两个不同状态，因此，中子与质子之间的转变相当于一个量子态跃迁到另一量子态，在跃迁过程中同时放出电子和中微子，它们事先并不存在核内，导致产生光子的是电磁相互作用，而导致产生电子和中微子的是一种新的相互作用，费米称之为弱相互作用。

β^+衰变就是那一年约里奥–居里夫妇发现的放射正电子的人工放射性。

接着，维克（G.C.Wick）和贝特（H.Bethe）又分别根据费米理论预言了轨道电子俘获过程的可能性。这一现象于 1938 年被阿尔瓦雷兹（L.W.Alvarez）观察到了。

费米的β衰变理论取得了很大成功，得到了公认。然而直到 40 年代初，还没有任何实验能够实际观测到中微子的存在。

11.12.2 中微子存在的间接验证

中微子的性质很独特，它不带电，不能引起电离效应，不参与电磁相互作用和强相互作用，所以很难观测到它的踪迹。它很稳定，要观测到必须通过它与物质的相互作用。

1933 年，埃利斯和莫特（N.F.Mott）分析了 ThC 衰变为 ThD 的两个分支，提出与泡利一样的假设。

1934 年，亨德森（W.J.Henderson）利用磁聚焦的方法测量 ThC 和 ThC"的β连续能谱的上限，发现β曲线的上限急剧中断，与泡利预计的相符。

1938—1939 年间，克兰（H.R.Crane）和哈尔彭（J.Halpern）用云室观察放射性元素 ^{38}Cl 和β衰变，从观察到的电子在磁场中的偏转和核反冲的径迹，估算原子核的能量和动量，数据表明在衰变中存在第三个粒子。

在探测中微子历程中，我国物理学家王淦昌作出过突出的贡献。1941 年，王淦昌从抗战中的中国后方向《物理评论》投寄论文，题为《关于探测中微子的建议》[①]。他分析了克兰和哈尔彭有关β衰变中核反冲的实验后，认为由于反冲原子的电离效应太小，有必要用不同的方法来探测中微子。他指出："当一个β^+放射性原子不是放射一个正电子而是俘获一个 K 层电子时，反应后的原子的反冲能量和动量仅仅取决于所放射的中微子，原子核外电子的效应可以忽略不计。于是，只要测量反应后原子的反冲能量和动量，就比较容易找到所放射的中微子的质量和能量。而且，由于没有连续的β射线放射出来，这种反冲效应对所有的原子都是相同的。"他还建议以 ^{7}Be 为实验样品，通过 K 俘获的两种不同过程得到 ^{7}Li 的反冲能量。

文章发表于 1942 年。同年艾伦（J.S.Allen）就按照王淦昌的方案测量了 ^{7}Li 的反冲能量，取得了肯定的结果，但由于所用样品较厚以及存在孔径效应，没有观察到单能的 ^{7}Li 反冲。后来，又有几起实验均未获成功，直到 1952 年，罗德拜克（G.W.Rodeback）和艾伦的 ^{37}Ar 的 K 俘获实验才第一次测出 ^{37}Cl 的单能反冲能。同年戴维斯（R.Davis）测出 ^{7}Li 的单能反冲能量，与王淦昌的预期相符，间接地得到了中微子存在的实验证据。

11.12.3 直接捕捉中微子

1953 年，美国洛斯阿拉莫斯实验室的雷因斯（F.Reines）和柯恩（C.L.Cowan，Jr.）利用美国原子能委员会在南卡罗来纳州的萨凡纳河工厂的大型裂变反应堆，设计了一个规模巨大的实验方案。他们研究 $\bar{\upsilon} + p \rightarrow e^+ + n$反应，若能探测出反应的产物，正电子$e^+$和中子$n$，并测

---

① Kan Chang Wang,Phys Rev., 61(1942) p. 97.

出确切的反中微子ῡ与质子p的反应截面，就可以证明反中微子的存在

经过艰苦的工作，雷因斯和柯恩小组终于在 1956 年宣布，实验结果与理论预期相符，从而打消了关于中微子存在的任何怀疑。

11.13 介子理论和 μ 子的发现

在研究原子核性质的过程中，逐渐明确了核子之间的相互作用是一种短程力，其作用范围约为 10^{-13} 厘米。这种力远比电磁相互作用强大，因此不能简单归结为电磁相互作用，它是一种强相互作用。

1935 年日本物理学家汤川秀树（H.Yukawa）提出介子理论，用于解释强相互作用。他认为，核子之间是通过交换一种可称为介子（meson）的粒子发生相互作用。根据核力的作用范围，可以估算出介子的静止质量约为电子的二百多倍。

1937 年，安德逊和尼德迈耶（S.H.Neddemeyer）在宇宙线的研究中果然发现了质量约为电子的 207 倍的新粒子，这种粒子被称为μ介子。当时人们以为这就是汤川理论所预言的介子。但是后来又经过多年的研究，证明μ介子与原子核的相互作用很弱，不可能是汤川所预计的介子。直到 1947 年，英国物理学家鲍威尔（C.F.Powell）用核乳胶技术探测宇宙射线，发现另外还有一种粒子，质量为电子静止质量的 273 倍，被称为π介子。π介子才真正是汤川理论所预言的粒子。然而，进一步研究表明，核力的机制远比汤川理论复杂，不能简单地用核子之间交换粒子来解释，但汤川理论仍不失为粒子物理学历史上的重要工作。汤川型粒子是人们研究的一种重要模型，至今仍是研究的对象。

§11.14　强子结构和夸克理论

1932 年查德威克发现中子，是继 1911 年卢瑟福论证原子有核之后的又一重大进展，从此关于原子核结构的知识与日俱增。不久海森伯提出核是由质子和中子构成的主张，于是中子、质子和电子被认为是物质的三种基本成分。后来又认识到，质子和中子是比电子复杂的粒子，因为核子具有反常磁矩，会产生出乎意料的强磁场，这只能解释成核子内部有电流。五十年代，用电子散射方法研究核子结构，对核子内部电荷分布和磁性分布进行了测量。与此同时，一大批强子陆续被发现，这些强子的性质与核子类似。于是促使人们进行有关强子结构与分类的研究，最早提出强子结构模型的是费米和杨振宁。1949 年他们提出，当时已知的所有原子核及介子，都是由质子、中子和它们的反粒子组成。1955 年，坂田推广了费米–杨模型，提出所有强子都是由质子、中子和超子以及它们的反粒子组成。

1961 年盖耳曼（M.Gell—Mann）和奈曼（Y.Ne'man）提出用 SU(3)对称性对强子进行分类的“ 八重法 ”。1964 年，盖耳曼据此预言的重子Ω_被实验证实，进一步促使他提出假设，即作为 SU(3)群的物理基础的三重态，不仅是某种数学框架，而是三种不同的粒子。盖耳曼统称之为夸克，并且认为，夸克是自然界中更基本的物质组成单元，所有已知的强子都是由这三种夸克及其反粒子组成。由于夸克模型能够成功地解释许多已知事实，把极为复杂的事情变得非常简单，所以这一模型理论立即得到人们的普遍重视，于是掀起了一场寻找夸克的热潮。人们用海水和陨石作实验，探测宇宙射线，运用各种高能加速器，希望能找到夸克存在的证据。然而各种尝试最终都归于失败。

1967 年，美国斯坦福大学直线加速器中心（SLAC）建成一座长达 3 千米的电子直线加速器，可使电子加速到 20GeV。以费里德曼（J.I.Friedman）、肯德尔（H.W.Kendall）和泰勒（R.E.Tay—lor）为核心的实验小组用这台进行深度非弹性电子质子散射实验，得到了意想不到的结果。当时有一位理论家布约肯（D.Bjorken）把他们的新发现归结为所谓的无标度性（scaling）。然而，无标度性表示什么物理意义，一时尚不明了。

这时著名物理学家费因曼正好提出了部分子（Parton）模型，他认为 SLAC 的深度非弹性电子质子散射的反常结果，可以用部分子模型作出非常形象的说明。只要把核子看成是由许多部分子组成，电子打进去，跟部分子发生了弹性磁撞，就可以解释上述现象。因此，无标度性正是部分子模型的重要证据。

费因曼的部分子模型实际上就是盖耳曼的夸克模型。人们很快就明白了，这两种模型是等同的。于是夸克理论得到了实验的证实。

§11.15 奇异粒子的研究

1947 年在宇宙射线的研究中,首先观察到了奇异粒子,但只是在 1954 年加速器实验中产生了奇异粒子之后，再经过系统研究，这类粒子的“ 奇异 ”特性才逐渐明朗。所谓奇异粒子，是指当时新发现的一大批新粒子，如K^+、K^0、K^-、$\overline{K}_0$、Λ、Σ^+、Σ^0、Σ^-、Ξ^0、Ξ^+等等，它们的共同特点是：当它们由于粒子之间相互碰撞而产生时，总是一起产生，而且产生得很快，可是衰变却各自独立地行事，而且衰弱得很慢。简单说来，就是它们总是协同产生、非协同衰变。1953 年盖耳曼用一个新的量子数，即奇异数来表述这一特性，并假定在强相互作用中奇异数守恒，而在弱相互作用中奇异数可以不守恒，这样就可以对奇异粒子的特性作出恰当的解释。

当时对最轻的奇异粒子（现在称为 K 介子）的衰变过程发现了一个

疑难，即所谓的“θ－τ”疑难。这个疑难在于：实验中发现了质量、寿命和电荷都相同的两种粒子，一个叫θ介子，另一个叫τ介子。这两种粒子唯一的区别在于：θ介子衰变为两个π介子，而τ介子衰变为三个π介子。分析实验结果可以得出：三个π介子的总角动量为零，宇称为负，而两个π介子的总角动量如为零,则其宇称只能为正。鉴于质量、寿命和电荷这三项相同，这两种粒子应是同一种，但从衰变行为来看，如果宇称应守恒，则θ和τ不可能是同一种粒子。

1956 年，李政道和杨振宁对历史和现状作了全面考察，他们指出，这一疑难的关键在于人们认为微观粒子在运动过程中宇称必须守恒，强相互作用和电磁相互作用的过程中，宇称守恒是经过检验的，但在弱相互作用的过程中，宇称并没有得到判决性的检验，没有根据说它一定守恒。如果在弱相互作用过程中，宇称可以不守恒，则θ－τ疑难将迎刃而解。

李政道和杨振宁在他们的论文中还提出可以通过β衰变，π－μ－e 衰变和奇异粒子Λ^0衰变等实验来检验宇称是否守恒。这些实验的原理是，设置两组含弱相互作用而互为镜象的实验装置，考察这两组装置是否得出相同的结果，如果结果不一样，就可以肯定宇称不守恒。其中β衰变可以选钴–60（^{60}Co），测量极化的 ^{60}Co 原子核所放射的β粒子（即电子）的角分布，从而检验左右是否对称。

另一位华裔美籍物理学家吴健雄率先用 ^{60}Co 实验对宇称守恒作了检验。她证明在β衰变过程中，宇称确是不守恒的。

宇称守恒定律在弱相互作用领域中被推翻，使人们的传统观念受到冲击，极大地推动了粒子物理学的发展。

第十二章　激光发展简史

激光是 20 世纪中叶以后近二三十年内发展起来的一门新兴科学技术。它是现代物理学的一项重大成果，是 20 世纪量子理论、无线电电子学、微波波谱学以及固体物理学的综合产物，也是科学与技术、理论与实践紧密结合产生的灿烂成果。激光科学从它的孕育到初创和发展，凝聚了众多科学家的创造智慧。他们的探索精神，值得我们认真学习和总结[①]。

§12.1　爱因斯坦提出受激辐射概念

激光的理论基础早在 1916 年就已经由爱因斯坦奠定了。他以深刻的洞察力首先提出了受激辐射的概念。所谓受激辐射的概念是这样的：处于高能级的原子，受外来光子的作用，当外来光子的频率正好与它的跃迁频率一致时，它就会从高能级跳到低能级，并发出与外来光子完全相同的另一光子。新发出的光子不仅频率与外来光子一样，而且发射方向、偏振态、位相和速率也都一样。于是，一个光子变成了两个光子。如果条件合适，光就可以象雪崩一样得到放大和加强。特别值得注意的是，这样放大的光是一般自然条件下得不到的“相干光”。

爱因斯坦是在论述普朗克黑体辐射公式的推导中提出受激辐射概念的。这篇论文题为《辐射的量子理论》，发表在德文《物理学年鉴》上。爱因斯坦在玻尔能级理论的基础上进一步发展了光量子理论，他不但论述了辐射的两种形式：自发辐射和受激辐射，而且也讨论了光子与分子之间的两种相互作用：能量交换和动量交换，为后来发现的康普顿效应奠定了理论基础（参看§9.1）。

不过爱因斯坦并没有想到利用受激辐射来实现光的放大。因为根据玻尔兹曼统计分布，平衡态中低能级的粒子数总比高能级多，靠受激辐射来实现光的放大实际上是不可能的。

因此在爱因斯坦提出受激辐射理论的许多年内，这个理论并没有太多运用，仅仅局限于理论上讨论光的散射、折射、色散和吸收等过程。直到 1933 年，在研究反常色散问题时才触及到光的放大。

§12.2　负色散的研究

[①] 本章主要参考下列资料写成：M.Bertolotti,Masers and Lasers,An Historical Ap- proach,Adam Hilger,1983; Lasers＆Applications,LaserPioneerInterviews,High Tech.,1985

色散理论早在1900年就由特鲁德（P.Drude）建立，能够解释一部分实验结果。但它是建立在经典电磁理论上的，与玻尔的稳态原子模型有矛盾，所以在一、二十年代里陆续有一些学者致力于用量子理论说明色散现象，其中包括德拜和索末菲。到了1928年，德国光谱学家拉登堡（R.W.Ladenburg）得到了一个折射率n随波长λ变化的量子理论公式：

$$n-1=e^2/4\pi mc^2\left\{\lambda_{21}^3/\left[\lambda-\lambda_{21}\right]\right\}\cdot F$$ 而

$$F=N_1 f_{21}\left\{1-\left[N_2/N_1\right]\cdot\left[g_1/g_2\right]\right\}$$

其中e和m表示电子的电荷与质量，N_2与N_1分别是高能级2与低能级1的原子数，g_1与g_2表示相应能级的统计权重，λ_{21}是2→1跃迁的辐射波长，f_{21}是一系数。式中$\{1-[N_2/N_1][g_1/g_2]\}$称为负色散项，表示由于高能级2有一定的原子数而作的修正，F叫做色散系数。

拉登堡和他的合作者在1926—1930年做了一系列实验，研究氖的色散，观测色散随放电电流密度变化的情况。他们利用贾民（Jamin）干涉仪，如图12–1。光经过玻璃板P_1分成两束，一束经受激介质，另一束经正常介质，再会合于P_2后用光谱仪观测。他们在氖的谱线6334Å、6383Å及6402Å附近观察到了钩形的干涉图形。根据仪器的结构、相邻干涉条纹的间隙和干涉条纹的弯曲程度可以求得色散系数。

■图12–1 观测反常色散的仪器

最引人注目的是色散系数随放电电流密度变化的关系。拉登堡用的放电管长50和80厘米，直径8—10毫米。放电电流在0.1—700毫安之间变化。实验结果表明，放电电流在100毫安以下时，色散系数F一直随电流增加，说明负色散项中的比值N_2g_1/N_1g_2可以忽略不计，而当电流超过100毫安时，该系数开始下降（如图12–2）。这表示高能级的N_2值不能忽略。如果拉登堡继续增大放电电流，肯定会发现F值由正变负的情况。F＜0，意味着$N_2g_1/N_1g_1>1$，也即$N_2/g_2>N_1/g_1$。可是无论是拉登堡还是其他研究反常色散的研究者都没有继续这项试验，因为人们对平衡态是如此地坚信不移，以致于都认为不可能偏离太远，不会得到负吸收。

■图12–2 拉登堡的色散系数随放电电流密度变化的曲线（1933）

到了1940年，苏联有一位物理学家在做博士论文时注意到了负吸收。他在博士论文中写道[①]：

“对于分子（原子）的放大，N_2/N_1大于g_2/g_1是必需的。尽管这一集居数（即粒子数）之比在原则上可以达到，但迄今尚未观测到这种情况。”他显然已经预见到了利用某种辅助手段使高能级的“浓度”大于平衡态下的“浓度”。这位物理学家叫法布里坎特。他虽然没有具体实现自己的方案，但作为粒子数反转这一物理思想的倡导者，他的贡献是

---

① 转引自M.Bertolotti,Masers and Lasers: An Historical Approach,Adam Hilger,1983p. 27.

不应忽视的。

§12.3　磁共振的研究

1946 年，瑞世科学家布洛赫（F.Bloch）在斯坦福大学研究核磁感应，他正是因为这项发现后来在 1952 年与珀赛尔（E.M.Pur–cell）共获诺贝尔物理奖。实验中他和他的合作者观察到了粒子数反转的信号。他报告说[①]：

“正如我们所期望的……信号一直保持原来的正值。然而几秒钟后信号变小了，消失了，然后以负值出现，又过了几秒钟达到最大的负值。在外界条件固定的情况下出现信号的异常逆转表示质子自旋重新取向的渐变过程”。

布洛赫一心想的是如何精确测定原子的弛豫时间，没有把这一新现象联系到集居数问题，更没有想到要利用这一现象来实现粒子数反转。直到 1958 年才有人重新研究并运用于二能级固体微波激射器。

1947 年，兰姆（W.E.Lamb,jr.）和雷瑟福（R.C.Retherford）在关于氢的精细结构的著名论文中加有一个附注，指出通过粒子数反转可以期望实现感应辐射（即受激辐射）。

1973 年，兰姆回顾往事时写道[②]“当时负吸收的概念对我们来说是新颖的，我们又不知道先前的文献……我们没有把负吸收与自持振荡联系到一起。”

“不过，即使我们这样做了，至少还有三个因素会使我们发明不成脉塞：1.我们的兴趣集中在氢的精细结构上，2.预期的吸收（增益）很小，其正负可疑，3.在我们用的频率上很容易实现振荡。”

1948 年，核磁共振的另一位发现者珀赛尔有意识地研究了磁场中各子能级的集居数。1951 年他和合作者第一次在实验中实现了粒子数反转，观察到了负吸收。他们首先提出了负温度的概念。珀赛尔发现 LiF 晶体在 50kHz 附近会产生零场谐振，时间很长。于是将这晶体置于磁场中并突然令磁场反向，反向的时间比自旋–点阵的弛豫时间要短得多。因此在磁场换向时，核自旋的组态还来不及改变，这时就发生了负吸收（即辐射）。图 12–3 记录的是一份典型的实验曲线。最左边的峰是正常的谐振曲线。磁场换向后，第二个谐振峰向下，就相当于负吸收。负峰越来越小，直到被正吸收抵消，最后回到正值。这时，高能级和低能级集居数相等。逐渐增加的正峰表示重建热平衡分布。

---

① F.Bloch et al,Phys. Rev.,70(1946)p.474

② W.E.Lamb,Jr.,in B. Kursuneglu and A.Erlmutter(eds.),Impact of Basic Re-search on Technology3Plenum,1973,p.85.

■图 12–3 珀赛尔的反转核磁化记录

1949 年，法国物理学家卡斯特勒（A.Kastler）发展了光泵方法，为此他获得了 1971 年诺贝尔物理奖。所谓光泵，实际上就是利用光辐射改变原子能级集居数的一种方法。他原来的目的是要建立一种用光探测磁共振的精密测量方法，没有想到可以实现粒子数反转，更没有想通过这一途径进行光的放大。不过，他的工作为以后的固体激光器提供了重要的抽运手段。

由于第二次世界大战中雷达得到广泛运用，微波技术发展很快，微波器件充分发展，磁共振方法因而得到研究，光泵方法也大显身手。微波波谱学发展起来了，也就为发明微波激射放大器（脉塞）准备了充分条件。

1952 年，韦伯（F.Weber）在著名光谱学家赫兹堡（G.Herzberg）主持的受激辐射讨论会上得到启示，产生了利用受激辐射诱发原子或分子，从而放大电磁波的思想。他提出了微波激射器的原理。韦伯的方法后来并没有实现，但是他的论文对汤斯（C.Townes）产生了影响。

§12.4 微波激射器的发明

汤斯是美国南卡罗林纳人，1939 年在加州理工学院获博士学位后进入贝尔实验室。二次大战期间从事雷达工作。他非常喜爱理论物理，但军事需要强制他置身于实际工作之中，使他对微波等技术逐渐熟悉。当时，人们力图提高雷达的工作频率以改善测量精度。美国空军要求他所在的贝尔实验室研制频率为 24000MHz 的雷达，实验室把这个任务交给了汤斯。

汤斯对这项工作有自己的看法，他认为这样高的频率对雷达是不适宜的，因为他观察的这一频率的辐射极易被大气中的水蒸汽吸收，因此雷达信号无法在空间传播，但是美国空军当局坚持要他做下去。结果仪器做出来了，军事上毫无价值，却成了汤斯手中极为有利的实验装置，达到当时从未有过的高频率和高分辨率，汤斯从此对微波波谱学产生了兴趣，成了这方面的专家。他用这台设备积极地研究起微波和分子之间的相互作用。

这时珀赛尔和庞德在哈佛大学已经实现了粒子数反转，不过信号太弱，人们无法加以利用。“并不是人们认为不能实现粒子数反转，而是没有办法放大，无法利用这一效应，”汤斯回忆说。他也和其他物理学家一起，正在苦思这个问题。他设想如果将介质置于谐振腔内，利用振荡和反馈，就可以放大。汤斯很熟悉无线电工程，所以别人没有想到的，他先想到了。

关于他是如何构思出第一台微波激射器的，汤斯回忆他于 1951 年春

天在华盛顿参加一个毫米波会议时的情景[1]：

“很偶然，当时我正与肖洛（A.L.Schawlow）同住一个房间。后来他也参与了激光工作。我起身很早，为了不打扰他，我出去在公园旁的长凳上坐下，思考是什么原因没有制成（毫米波发生器）？很清楚，需要找到一种制作体形极小而又精致的谐振器的方法。这种谐振器具有可以与电磁场耦合的某种能量。这象是分子一类的东西，要做出这样小的谐振器并供给能量会遇到多么大的技术困难？看来真正的希望在于找到一种利用分子的方法。也许正是早晨新鲜的空气使我突然看清了这个方案的可行性。几分钟内我就草拟好了方案，并计算出下列过程的条件：把分子束系统的高能态从低能态分开，并使之馈入腔中，腔中充有电磁辐射以激发分子进一步辐射，从而提供了反馈，保持持续振荡。”

汤斯在会上没有透露任何想法，立即返回哥伦比亚，把他的研究组成员召集拢来，开始按他的新方案进行工作。这个组的成员有博士后齐格尔（H.J.Zeiger）和博士生戈登（J.P.Gordon）。后来齐格尔离开哥伦比亚，由中国学生王天眷接替。汤斯选择氨分子作为激活介质，这是因为他从理论上预见到，氨分子的锥形结构中有一对能级可以实现受激辐射，跃迁频率为 23870MHz。氨分子还有一个特性，就是在电场作用下，可以感应产生电偶极矩。氨的分子光谱早在 1934 年即有人用微波方法作出了透彻研究。1946 年又有人对其精细结构作了观察，这都为汤斯的工作奠定了基础。汤斯设计的微波激射器如图 12–4 所示。他们在论文中作了如下说明[2]：

“氨分子束从束源射出后进入聚焦电极系统。这些电极建成沿射线轴的柱形四极静电场。在反转能级中，高能态分子受沿半径方向向内的（聚焦）力，而低能态受沿半径方向向外的力，于是到达空腔的分子实际上都是高能态的。当腔内存有分子束时，空腔中感应出跃迁，从而引起了空腔能量的变化。不同频率的功率输经空腔，当速调管的频率调到分子跃迁频率时，观察到了发射谱线。

■图 12–4 汤斯的微波激射器原理图

“如果从分子束发射的功率足以在腔内保持足够的场强，以达到可以引起后续分子束感应跃迁的程度，就会产生自持振荡。这样的振荡已经产生，尽管功率尚未直接测出，但估计约为 10^{-8} 瓦。振荡的频率稳定度可与各种可能的‘原子钟’不相上下。”

汤斯小组历经两年的试验，花费了近 3 万美元。1953 年的一天，汤斯正在出席波谱学会议，戈登急切地奔入会议室，大声呼叫道：“它运转了。”这就是第一台微波激射器。汤斯和大家商议，给这种方法取了

---

[1] 转引自 M.Bertolotti Masers: An Historical Approach, Adam Hilger,1983,p.27

[2] J. P.Gordon et al, Phys. Rev.,95(1954) p. 282.

一个名字，叫“ 微波激射放大器 ”。英文名为“ Mi—crowave Amplification byStimulatedEmissionofRadiation ”，简称 MASER（脉塞）。

与此同时，还有几个科学集体在尝试实现微波的放大。在苏联的莫斯科，列别捷夫物理研究所普洛霍洛夫和巴索夫的小组一直在研究分子转动和振动光谱，探索利用微波波谱方法建立频率和时间的标准。他们认定，只要人为地改变能级的集居数就可以大大增加波谱仪的灵敏度，并且预言，利用受激辐射有可能实现这一目标。他们也用非均匀电场使不同能态的分子分离，不过他们的装置比汤斯小组的晚了几个月才运转。

另有一位美国学者布隆姆贝根（N.Bloembergen）也对微波激射器作出了重要贡献。他原是荷兰人，曾在第二次世界大战后到美国参加珀赛尔小组的核磁共振研究。1956 年，他提出利用顺磁材料中的塞曼能级做成可调谐的微波激射器。特别值得提出的是他和前面两位苏联科学家利用三能级系统的思想，为后来微波激射器和激光器的发展指明了方向。

不久，贾万（A.Javan）提出用非线性双光子过程进行微波放大。斯柯维尔（H.E.D.Scovil）等人在 1957 年实现了固体顺磁微波激射器，布隆姆贝根等人在 1958 年也做成了红宝石微波激射器。

至此，激光的出现已是指日可待了。人们经过各方面的努力，为激光的诞生作好了各种准备。1958 年，许多物理学家活跃在分子束微波波谱学和微波激射器的领域里，他们自然会想到，既然微波可以实现量子放大，为什么不能推广到可见光，实现光的放大？

一场竞争在国际间展开，看谁最先摘下激光这顶桂冠。

§12.5　激光的设想

50 年代初，尽管微波激射器还刚刚兴起，已经有人开始考虑在比微波波长更短的范围内实现量子放大。上面提到的苏联科学家法布里坎特在 1951 年就曾向苏联邮电部提出一份专利申请书，题目叫：“ 电磁波辐射（紫外光、可见光、红外光和无线电）放大的一种方法，特点是被放大的辐射通过一种介质，用其他方法和辅助辐射使相当于激发态的高能级上的原子、其他粒子或系统的浓度增大，超过平衡浓度。 ”可是这项申请直到 1959 年才得到批准和发表。看来，这项建议即使在苏联也没有起到显著影响。

在美国，1956 年狄克（R.H.Dicke）发展了一个概念，叫“ 超发光 ”（superradiance），还提出了“ 光弹 ”（optical bomb）的设想，里面包含了粒子数反转的思想。所谓超发光，是指当激发脉冲过后，由于自发辐射会产生一极强的光。同时他还在专利申请书中提出了运用法布里—珀罗干涉仪作为谐振腔的设想。不过，这项申请书是在 1957 年才批准的，

对公众的影响不大。

最先发表激光器的详细方案是汤斯和肖洛。1957 年他们开始考虑‘ 红外和可见光激射器 ” 的可能性。

肖洛 1921 年生于美国纽约，在加拿大多伦多大学毕业后又获硕士和博士学位。第二次世界大战后，肖洛在拉比（I.I.Rabi）的建议下，到汤斯手下当博士后,研究微波波谱学在有机化学中的应用。他们两人 1955 年合写过一本《微波波谱学》[①]，是这个领域里的权威著作。当时，肖洛是贝尔实验室的研究员，汤斯正在那里当顾问。

1957 年，正当肖洛开始思考怎样做成红外激射器时，汤斯来到贝尔实验室。有一天，两人共进午餐，汤斯谈到他对红外和可见光激射器很感兴趣，有没有可能越过远红外，直接进入近红外区或可见光区。近红外区比较容易实现，因为当时已经掌握了许多材料的特性。肖洛说，他也正在研究这个问题，并且建议用法布里–珀罗标准具作为谐振腔。两人谈得十分投机，相约共同攻关。汤斯把自己关于光激射器的笔记交给肖洛，里面记有一些思考和初步计算。汤斯原来考虑选铊（Tl），在以玻璃为壁的四方盒中，充有铊作为工作介质，用铊灯的紫外线照射以激发铊原子，使它从基态 6p 跃迁到高能态 6d 或 8s。

对于汤斯这一构思，肖洛进行分析。他认为这个方案不容易实现，因为铊原子低能态的空出时间要比高能态的填充时间慢，无法实现粒子数反转。肖洛在许多数据表中查找，希望能使振荡器满足要求，最后选择了硷金属的钾。钾也不很理想，因为它并不稳定，选钾的原因是因为钾光谱中有两条是可见光。

再就是谐振腔。肖洛想了各种方案，其中包括利用衍射光栅作为谐振腔腔壁，后来才选定法布里–珀罗式的结构。肖洛在做研究生论文时就熟悉光谱方法，尤其擅长运用法布里–珀罗干涉仪。他很欣赏法布里–珀罗干涉仪的特点，其选频特性是如此之尖锐，竟可以把空腔里大多数振荡模滤掉，达到选模目的而不至于跳模。不过，后来他实际上只利用了两个平行反射镜，让光在中间往复反射，已经失去了光谱学上的意义。前面讲过狄克在肖洛之前也想到利用法布里–珀罗干涉仪。肖洛显然不是从他那里得到的启发，因为狄克的设想当时并没有发表，何况肖洛想到的远比狄克具体，肖洛还想到要让两面反射镜中有一面可以透光。

1958 年春，汤斯和肖洛决定将自己的理论分析写成论文，并申请专利。在申请专利时，竟遭到贝尔实验室专利办公室负责人的拒绝，他认为光对通讯不会有什么重要性，不涉及贝尔实验室的利益。只是由于汤斯的坚持，才作了申请并于 1960 年获得批准。肖洛和汤斯的论文 1958 年 12 月在《物理评论》上发表后，引起强烈反响。这是激光史上有重要

[①] C.H.Townes and A.L.Schawlow,Microwave Spectroscopy McGraw-Hill,1955.

意义的历史文献。汤斯因此于 1964 年获诺贝尔物理奖。

这篇论文的题目叫：《红外区和光学激射器》[1]，主要是论证将微波激射技术扩展到红外区和可见光区的可能性。

他们建议：有选择地增大某些模的 Q 值，从而增强选择性。他们从理论上对振荡条件作了推导，并且举例说明产生振荡的可能性。

文中具体报导了肖洛以钾作的初步实验。他们提出还可以利用铯作工作介质，靠氦谱线进行激发。他们也考虑到了固体器件，然而并不十分乐观，因为固态谱线一般较宽，选模会更困难，而可利用的频率合适的抽运辐射又很有限。他们表示：" 可能还有更美妙的解答。也许可以抽运到亚稳态以上的一个态，然后原子会降到亚稳态并且积累起来，直到足以产生激射作用。 "

在肖洛和汤斯的理论指引下，许多实验室开始研究如何实现光学激射器，纷纷致力于寻找合适的材料和方法。

汤斯和他的小组也在用钾进行试验。他的小组成员里有一名高反膜专家，是英国人， 叫海文思（O.S.Heavens）。汤斯深知腔镜是整个系统的关键问题，希望靠这位专家解决技术问题。然而实验仍然归于失败。看来，由于反射镜处于谐振腔内部，离子不断轰击造成膜层退化，即使反射镜的质量再高也无济于事。

在贝尔实验室，肖洛开始研究把红宝石当作工作介质的激光器。他对固体器件很有信心，认为：" 在气体中所作到的任何事情，在固体中都能做得更好。 " 但是他在工作中犯了一个错误，误以为红宝石的 R 线（即 6934Å 与 6929Å）不适于产生激光。他在 1959 年第一届国际量子电子学会议上报告说：

" 在绿色区有一条宽吸收带，在紫外区也有几条。当经这些吸收带激发时，晶体发射出几条深红色的窄带（近于 7000Å），两条最强的线（6919Å 和 6934Å）相应于回到基态，所以低能态上原子总是较多，而并不适于激光行动。但最强的伴线（7009Å）……回到更低的能态，在液氦温度下一般是空的，也许有用……固体脉塞可以做得特别简单。基本上它就是一根棒，一端全反射，另一端也差不多是全反射。侧面保持光泽，以便接收抽运辐射。 " 肖洛没有做成红宝石激光器，却启示梅曼（T.Maiman）做出了第一支激光器。

§12.6　梅曼与第一支激光器的诞生

梅曼是美国休斯（Hughes）研究实验室（在加州南部）量子电子部年轻的负责人。1960 年，梅曼才 33 岁，他于 1955 年在斯坦福大学获博

---

[1] A. L.Schalow and C.H.Townes,Phys.Rev.112(1958),p.1940

士学位，研究的正是微波波谱学。在休斯实验室梅曼做微波激射器的研究工作，并发展了红宝石微波激射器，不过需要液氮冷却，后来改用干冰冷却。梅曼能在红宝石激光器首先作出突破，并非偶然，因为他已有用红宝石进行微波激射器的经验多年，他预感到红宝石作为激光器的可能性，这种材料具有相当多的优点，例如能级结构比较简单，机械强度比较高，体积小巧，无需低温冷却等等。但是，当时他从文献上知道，红宝石的量子效率很低，例如：外德尔（I.Weider）在1959年曾报导过，量子荧光效率也许仅为1%。如果真是这样，那就没有用场了。梅曼寻找其他材料，但都不理想，于是他想根据红宝石的特性，寻找类似的材料来代替它。为此他测量了红宝石的荧光效率，没有想到，荧光效率竟是75%，接近于1。梅曼喜出望外，决定用红宝石做激光元件。

通过计算，他认识到最重要的是要有高色温（大约5000K）的激励光源。起初他设想用水银灯把红宝石棒放在椭圆形柱体中，这样也许有可能起动。但再一想，觉得无需乎连续运行，脉冲即可，于是决定利用Xe灯。梅曼查商品目录，根据商品的技术指标选定通用电气公司出产的闪光灯，是用于航空摄影的，有足够的亮度。但这种灯具有螺旋状结构，不适于椭圆柱聚光腔。他又想了一个妙法，把红宝石棒插在螺旋灯管之中，红宝石棒直径大约为1厘米，长为2厘米，正好塞在灯管里。红宝石两端蒸镀银膜，银膜中部留一小孔，让光逸出，孔径的大小，通过实验决定。图12–5就是梅曼的第一台红宝石激光器装置图。

就这样，梅曼经过9个月的奋斗，花了5万美元，做出了第一台激光器。可是当梅曼将论文投到《物理评论快报》时，竟遭拒绝。该刊主编误认为这仍是微波激射器，而微波激射器发展到了这样的地步，已没有什么必要用快报的形式发表了。梅曼只好在《纽约时报》上宣布这一消息，并寄到英国的《自然》杂志去发表。第二年，《物理评论》才发表他的详细论文。■图12–5 梅曼的第一台红宝石激光器装置图

§12.7　四能级激光器

梅曼发明红宝石激光器后才几个月，用掺三价铀的氟化钙做工作介质的激光器也诞生了。这种激光器是根据四能级系统原理工作的，这个原理在梅曼的论文中已有详尽讨论。它的优点是阈值较低，容易形成振荡。发明者是IBM公司的两位年轻科学家，一位叫索洛金(P.Sorokin)，是布隆姆贝根的研究生，另一位叫史蒂文森(M.J.Stevenson)，是汤斯的研究生。两人获得博士学位后进入IBM公司从事固体的微波共振研究(IBM公司的介绍见§14.5）。肖洛和汤斯的论文发表后，他们决心转向光学

---

① Maimanetal,Phys.Rev.123(1961)，p.1154.

激射器的研制，希望找到一种更理想的固体材料，用普通的灯进行抽运。他们先是想把固体的工作介质做成长方形块，表面抛光。光线在固体块中来回往返，最后从切去的一个角输出。只要介质的折射率稍大于 $\sqrt{2}$，光线就可以经全反射几乎无损耗地在里面多次往返。他们选择氟化钙作为基质材料，因为这种材料的折射率正好符合要求。激活离子则考虑稀土元素，因为这类元素具有 4f 壳层。他们在文献中查找资料，最后从苏联人费阿菲洛夫的论文中找到了两种材料可以掺进氟化钙。一种是与稀土族非常相近的三价铀(U^{3+})，在 2.5 微米处产生荧光；另一种二价钐(Sm^{2+})。这两种结构都属于四能级系统，不过要工作在低温状态。他们请两家公司生长了这两种不同的掺杂的晶体，再加工成长方形。正在这时，梅曼的红宝石激光器宣告成功，他们受到启发，立即将自己的晶体也改为圆柱形，在表面镀银，很快就试验成功了 CaF_2：U^{3+}激光器，接着又做成了 CaF_2：Sm^{2+}激光器。

索洛金和史蒂文森演示的第二台和第三台激光器实用价值不大，但他们利用四能级系统为后来的工作开辟了道路。

§12.8　氦氖激光器的诞生

氦氖激光器是这二三十年中广泛使用的一种类型。它是紧接着固体激光器出现的一种以气体为工作介质的激光器。它的诞生首先应归功于多年对气体能级进行测试分析的实验和理论工作者。到 60 年代，所有这些稀有气体都已经被光谱学家作了详细研究。

不过，要应用到激光领域，还需要这个领域的专家进行有目的的探索。

又是汤斯的学派开创了这一事业。他的另一名研究生，来自伊朗的贾万 1954 年以微波波谱学的研究获博士学位后，留在哥伦比亚大学任教。当贾万后来被问及为何涉足于激光时，他答道①：

“当我还是孩提时，血液中就有了科学。我迷恋于光和辐射过程，所以就从事物理学。我在哥伦比亚大学跟汤斯做微波波谱学的博士论文，虽然没有直接参加微波激射器的工作，但我亲眼看到整个领域的进展。那些岁月在哥伦比亚确实是激动人心的，查理（指汤斯）、拉比、兰姆发现了脉塞、电子反常 g 因子和兰姆位移。”

贾万接着说他后来也卷进到脉塞的研究中，甚至独立地想到了三能级系统的工作原理，不过由于别的原因直到 1957 年才发表。本来，汤斯要贾万研究亚毫米波，但贾万希望直接从事光波领域，他有把握在这个领域内获得增益。他并不知道汤斯正在跟肖洛合作研究光学激射器，更

---

① 转引自 Lasers & Applications,LaserPioneerInterviews,HighTech.,1985p.115.

没有从汤斯那里得知他们的想法。甚至肖洛和汤斯合写的那篇著名论文他也没有读过。他走的是自己的路，按自己的想法进行计算，设计自己的抽运系统。关于这件事，贾万后来说：“我跟查理有亲密联系，但我确实非常感激他没有把自己关于激光器的想法告诉我，这样就不会扰乱我的思想，我就可以发展自己的想法。”贾万的基本思路就是利用气体放电来实现粒子数反转，他认为这要比光泵方法更有效，因为这是气体而不是固体。

利用气体放电来实现粒子数反转这一思想也不是贾万首先提出的。前面讲过，苏联的法布里坎特早在 1940 年就提过这类设想。1950 年兰姆明确提出，气体放电中的电子碰撞可以改变粒子的集居数。1959 年，贝尔实验室的英国学者桑德尔斯(J.H.Sanders)也和贾万同时发表了用电子碰撞激发的理论。不过，贾万考虑得更深入更具体，他在分析了各种碰撞情况后，提出可以由两种原子的混合气体来实现粒子数反转，他写道[①]：

“考虑原子的一个长寿命的能态（如亚稳态），这一能态在一般的电子密度情况下有相当多的粒子。

“如果第二种原子的激发态正好与第一种原子的亚稳态在能量上非常接近，则可预期非弹性碰撞会有很大的截面，从而导致亚稳态向另一原子的激发态的激发转移，或作相反的转移。

“由于碰撞过程的非浸渐性(non–adiabatic)，显著偏离第一种原子亚稳态的第二种原子各能态，不会有明显的激发转移截面”。

就在这篇论文中，贾万提出了氪–汞和氦–氖两种方案。

关于贾万的创造活动，需要补充两点，说明他在独立思考的基础上，还是注意吸取他人经验的。一是他在论文中引述了拉登堡 1933 年的工作，可见他对过去的研究成果是熟悉的。第二点是他原来并没有想到可以利用法布里–珀罗反射镜片。只是有一天偶然和肖洛的谈话得知这个方法，很受启发，在这以后他才进行气体激光器的具体设计。贾万首选氦氖气体作为工作介质是一极为成功的选择。当人们问他在许多早期的激光器中，其中包括气体的和固体的，都已相继销声匿迹，而他选择的氦氖激光器却仍葆其青春，他为什么能够这么早就作出成功的选择时，他回答说：

“这并非偶然……我作了仔细选择，……氦氖是我能找到的最清洁的系统之一。”

贾万初创时走过了一段艰辛的历程，当时他为了调整两块平面镜的取向，竟花费了差不多 6—8 个月的时间。

贾万最初得到的激光束是红外谱线 1.15 微米。氖有许多谱线，后来

[①] A.Javan. Phys.Rev.Lett.,3(1959)p．87

通用的是 6328Å。为什么贾万不选 6328Å，反而选 1.15 微米呢？这也是贾万高明的一着。他根据计算，了解到 6328Å 的增益比较低，所以宁可选更有把握的 1.15 微米。如果一上来就取红线 6328Å，肯定会落空的。

贾万和他的合作者在直径 1.5 厘米，长 80 厘米的石英管两端贴有蒸镀 13 层介质膜的镜片，放在放电管中，用无线电频率进行激发。在 1960 年 12 月 12 日下午 4 点 20 分，终于获得了红外辐射。

1962 年，贾万转到麻省理工学院(MIT)任教。实验工作由他的同事怀特(A.D.White)和里顿(Rigden)继续进行。他们获得了 6328Å 的激光束。这时激光器的调整已积累了丰富经验。图 12–6 是经里格罗德(W.W.Rigrod)等人改进的氦氖激光器。他们把反射镜从放电管内部移到外部，避免了复杂的工艺；窗口做成按布鲁斯特角固定，再把反射镜做成半径相等的共焦凹面镜。激光管的设计日臻完善。

■图 12–6 经里格罗德等人改进的氦氖激光器

氦氖激光器在两方面有里程碑意义。一方面它第一次实现了连续性。固体激光器都是脉冲型的，不适于一般使用。连续激光束有很多好处，为应用开辟了广阔的道路。另一方面证明了可以用放电方法产生激光，只要在两种不同的工作介质中选定适当的能级，就有可能实现光的放大，为激光器的发展展示了多种渠道的可能性。

在激光的发展史中有一个小插曲，是古尔德(G.Gould)提出的发明权问题。当汤斯和肖洛在构思光学激光器之际，古尔德正在哥伦比亚大学当博士研究生，在库什(P.Kusch)教授手下做铊原子束共振实验。起初他用热学或放电方法激发铊原子，已经搞了三四年了，一直未见成效。这时，拉比教授从国外开会回来，带回了光泵（即光抽运）方法的新闻，建议古尔德试试。古尔德经过试验，果然灵验，有 5%的原子进入亚稳态，这促使他对光泵方法发生了浓厚兴趣。

就在这时，古尔德产生了用光泵方法实现粒子数反转的想法，并且设计了用法布里–珀罗干涉仪镜片作成的谐振腔。他的想法和汤斯–肖洛可以说是异曲同工。他在笔记本上写下了自己的想法和计算，并为光学激射器起了一个名字叫 LASER，取自英文“LightAmplification by Stimulated Emission of Radiation”（靠辐射受激发射的光放大）的头几个字母。1957 年 10 月，他在家里接到汤斯的电话，询问有关铊灯的知识，从而得知汤斯正在进行类似的工作，预感到将会发生一场发明权之争。于是他连忙请一位公证人将自己的笔记签封，以备申辩。这个笔记本的前 9 页载有古尔德的初步设计和计算，还包括有 LASER 的定义。

然而，由于某些原因，古尔德没有及时申请专利，他的导师库什又不同意他以激光代替原来的题目：《原子束共振》。他愤而放弃博士学位，离开哥伦比亚，转入一家名叫 TRG 的公司任职。这家公司欣赏他的激光研究计划，以“激光用于雷达，测距和通讯系统”为题向美国国防

部的高级研究规划局申请30万元经费，而这个局以为由此可能导致“死光”的实现，又加码到100万美元。这件事本来对激光技术会有促进作用，可是由于国防保密的人事审查，古尔德因其夫人有参加过马克思小组的嫌疑而被排除在项目之外，只当挂名的顾问。这家公司虽然在1961年做出了光泵铯激光器，但没有什么实用价值。

古尔德心中不平，多次向专利局申请专利，进行诉讼，一直被推迟判决。1977—1979年才取得两个具体项目的专利。古尔德坚持上诉，直到1987年11月4日才得到胜诉，但时光已经过去快三十年。在这中间汤斯和肖洛都因激光的研究先后获得了诺贝尔物理奖。

科技史上同时而又独立地作出发现或发明的事例不胜枚举，激光的发展史中也不乏其例。这些事例正说明了，激光的出现是科学技术发展的产物，是历史的必然。

§12.9 激光稳频的实现——兰姆凹陷的发现

兰姆凹陷的发现和应用是科学与技术，理论与实践密切结合取得重要成果的又一个极好例证。

He–Ne激光器发明两年后，1962年，兰姆位移的发现者，诺贝尔物理奖得主小W.E.兰姆教授正在耶鲁大学对氦氖激光器作理论分析。他的目的是要根据原子在电磁场作用下振荡的经典模型，计算激光强度随空腔参数改变的关系。他原来预计，空腔原子有一定的自然跃迁频率，当空腔频率与原子跃迁频率一致时，会因为谐振而使激光强度达最高值。可是出乎他的意料，计算所得的曲线却在谐振处呈现极小值，形成一凹陷。他花了许多时间反复核算，没有找出错误，肯定计算是正确的。当时，兰姆并不知道这就是由于饱和和多普勒频宽引起烧孔效应的后果（不久就清楚了），但是他敏感地预见到，这一凹陷有助于频率的稳定，因为他在理论计算中参考了二十年代电子学家范德泡尔(vanderPol)关于多频振荡器的理论，这一理论证明只要满足一定条件就可以出现频率锁定现象。

兰姆作出理论预测后，并没有马上发表，而是将手稿寄给激光器的另外两位先驱，贾万和本勒特(Bennett)，请他们发表意见。贾万回信说，他虽然没有观察到这个现象，但相信会有，因为他曾观察到与之有关的推频效应。本勒特则把自己的实验记录寄给兰姆，他在激光输出随调谐频率变化的曲线中没有找到凹陷信号，表示对此没有信心。他所在的贝尔实验室有一位同事叫R.A.麦克发伦(R.A.McFarlane),得知后对这个问题产生了兴趣，主动承担起实验研究的工作。他用磁致伸缩方法使氦氖激光器的光学腔改变长度，从而调整谐振频率，开始时，他的激光管中用的是自然丰度的气体（氖的成分为^{20}Ne，90.92%；^{21}Ne，0.26%；^{22}Ne，

8.82%），在谐振曲线上也没有观察到凹陷，但他注意到曲线有些不对称，似乎是两种频率叠加而成的。他意识到这可能是氖的同位素效应，于是在贾万的帮助下，做了 ^{22}Ne（纯度达 99.5%）的氦氖激光器，果然，在中心频率附近出现了微浅的凹陷信号。功率加大后，凹陷随之变深，形成明显的驼峰曲线。于是，麦克发伦、本勒特和兰姆三人联名于 1963 年发表了实验结果，正式宣布兰姆凹陷的存在。与此同时，贾万也发表了类似报告。从此，单模稳频氦氖激光器登上了精密计量工作的舞台，在长度和频率的计量中发挥了重要作用，并且开辟了激光稳频的广阔领域。

§12.10 激光技术的发展

以红宝石激光器为代表的固体激光器和以氦氖激光器为代表的气体激光器相继问世，引起了全世界科技界研究激光的热潮。人们认识到这是一块大有可为的新领域，在理论上和技术上又都已有相当充分的准备，于是就在六十年代初期展开了百花争艳的局面。

首先是对激光工作介质进行了普查。各种状态下近百种物质上千条谱线得到了研究。许多学科，例如：放电物理学、等离子体物理学、固体物理学、气体动力学、化学动力学等等和激光科学结合，纷纷取得成果，新的激光器陆续问世。下面略举几例：

1.1961 年钕(Nd)激光器的出现引人注目。首先由贝尔实验室的约翰森(L.F.Johnson)和纳桑(K.Nassan)做成的钕激光器是以钨酸钙作为基质，发出 1.06 微米的红外线。钕属于四能级系统，是一种很有效的固体激光材料，可以在室温下发出连续激光。同年 11 月，斯尼泽(E.Snitzer)发展钕玻璃激光器，可得大功率脉冲，后来在激光核聚变得到应用；1964 年 4 月贝尔实验室的范尤特(L.G.vanUitert)制成掺钕钇铝石榴石激光器(Nd^{3+}：YAG)。这种固体激光器阈值低，增益大，后来在科学技术上取得了广泛应用。

2.与此同时，气体激光器也有长足的发展。特性普查的结果，使氩、氪、氙等惰性气体和某些金属蒸气激光器陆续出现。贝尔实验室在 1963 年推出汞离子激光器；同年，来自印度的佩特尔(C.K.N.Patel)研制成功大功率的二氧化碳(CO_2)激光器。贝尔实验室在激光器的发展和应用上独占鳌头。

3.五十年代半导体物理学的研究在全世界范围里形成热潮，自然会有人想到用半导体产生微波激射和激光的可能性。例如纽曼(J.v.Neumann)在 1953 年就写下了用半导体产生受激辐射使光放大的想法。不过，直到 1959 年他去世时才公布于众。1957 年 4 月有两位日本研究人员为“半导体脉塞”向日本政府提出专利申请，1960 年获得批准。苏联的巴索夫小组则对半导体作为激射器，从机理上进行了透彻的理论

研究，提出了许多新建议。1961 年，他们建议应用高度掺杂简并(dopeddegenarate)半导体的 p—n 结，这一方法后来证明是成功的。法国的伯纳德(M.G.A.Bernard)等人对半导体中的受激辐射过程也作了详尽分析。

与此同时，实验也在积极进行。1962 年苏联有一小组报导在 77K 温度及大电流密度下观察到 GaAs 二极管的谱线变窄。美国麻省理工学院的开斯(R.T.Keyes)与林肯实验室的奎斯特(T.M.Quist)1962 年 6 月报告说 GaAs 二极管的量子效率达 85%。同年 7 月，在国际固体器件研究会议上展开了热烈的交流和讨论，促使半导体激光器的竞赛白热化。9 月，美国的通用电气公司(GE)的 RDL 实验室宣布做成二极管激光器。不出数日，IBM 公司的纳什(Nathan)小组也做成功。10 月，又有两个单位也做出样品。他们四家的半导体激光器非常相似，都需要脉冲大电流和液氮低温条件(77K)，离实用还有相当距离。到 1970 年，又是贝尔实验室首先做出了异质结半导体激光器，可以在室温下工作。

4.化学激光器和染料激光器。1960 年梅曼的第一支激光器诞生后，即有人建议从化学反应获得能量，以产生激光。许多人在这方面进行研究。1965 年美国加州贝克利分校的卡斯帕(J.V.V.Kasper)等人演示了第一支化学激光器——HCl 激光器，辐射出 3.7 微米的红外激光。

人们对连续可调的激光器有特别兴趣，因为这种激光器有广泛用途，于是染料激光器应运而生。在 1961 年就有人建议用有机染料作为工作介质，但由于通用电气公司试验失败，使许多人没有信心。直到 1966 年索洛金和他的小组才获得成功。

当时，索洛金是用有机染料作为红宝石激光器的 Q 开关，由此他对染料的光谱特性发生了兴趣。他首先观察到，当红宝石激光器的脉冲光照到溶于酒精的氯化铝酞花青染料时，染料发生了强烈的脉冲辐射，当他们把镜面布置在染料的两侧，想用照相底片记录红外辐射时，染料中红外辐射是如此的强烈，以至于竟把底片上乳胶烧了一个洞。不久西德普朗克研究所的科学家也独立地观察到这一现象。

1967 年可见光的染料激光器问世，随即出现了可调式染料激光器。首先作出可调式染料激光器的是休斯实验室的索佛尔(B.H.Soffer)和麦克发兰(B.B.McFarland)。他们把两面反射镜中的一面换成可以转向的衍射光栅。他们证明染料的自然宽带辐射可以变窄，并在很宽的光谱内调谐。后来又几经改进，染料激光器终于从脉冲型转变为连续型，从而在实验研究，特别是高精度的光谱实验方面得到了广泛应用。

此外，尚有自由电子激光器、准分子激光器、离子激光器等等。这些激光器各有特点，它们象雨后春笋一般地涌现出来，以适应科学技术各方面发展的需要。

第十三章　固体物理学简史

§13.1　历史概述

早在 1611 年，开普勒就开始思考雪花为什么呈六角形；1843 年法拉第曾惊奇地发现硫化银的电阻随着温度的升高而下降；1929 年迈斯纳又观测到硫化铜在非常低的温度下(2K)突然变成比纯铜还好得多的导体；从公元前 3000 年一直到本世纪初的整个历史阶段，人们一直被指南针为什么能指方向这个问题所困惑。固体物理学经过本世纪以来几十年的迅速发展，我们现在已从根本上完全理解了这些问题，而且可以依据物质的原子结构和电子结构来解释材料的各种特性；可以按照预先的构想和设计制备具有新奇性能的微结构固体，制备具有优异性能的人工材料和器件；还可以利用扫描隧道显微镜直接观察固体中原子的形貌及其运动；以及在极端条件下，如毫开量级的低温，10^{-10} 乇的超高真空，40 万千克/厘米 ^{2} 的超高压，强磁场，强光作用等极端条件下研究固体的原子结构、电子结构及其与宏观性质的关系。人们可以从固体的基本原理出发，建立物理模型，借助于大型计算机计算固体的电子结构，获得与实验大致符合的结果。

现在，固体物理学的领域已扩大成为包括量子液体 H_3、H_4 及其它液体的凝聚态物理学。自从第二次世界大战以来，固体物理学发展非常之快，已经成为当今物理学的重要分支学科之一。

§13.2　固体物理学的孕育时期

如果要从人类使用固体来谈固体物理学的发展史，那么可以追溯到几百万年前的石器时代，或者几万年前人类开始冶炼金属、制造农具和刀箭的时代。通过炼金术，人们了解了一些材料的颜色、硬度、熔化等性质，并用之于绘画、装饰等，但这只能说人们学会了使用固体。在这段漫长的历史时期中，固体并没有构成一门学问。到了 19 世纪，随着科技的进步，人们对固体的认识速度加快了。程度加深了。1830 年布拉菲(A.Bravais)提出了晶体结构的空间点阵学说，认为晶体的内部结构可以概括为是由一些相同的点子在空间有规则地作周期性地无限分布；尔后，熊夫利(A.M.Schoenflies)从理论上证明晶体有 32 个点群，230 个空间群；1827 年欧姆经过对不同材料导电性的研究建立了欧姆定律；1895 年居里在研究不同材料的磁性之后提出居里定律。尽管上述对固体的结构，固体在外场中的特性都是固体物理学的研究课题，尽管已经发现了很多新现象、新效应，但是当时还没有形成固体物理学，因为那时还没

有提出能够用于计（估）算、并与实验相符的物理模型。经过漫长岁月的孕育，特别是有了 19 世纪以来在晶体结构，固体的电学、磁学、光学、热学等方面的发展所奠定的基础，固体物理学才形成一门完整的学科。

§13.3　固体物理学的产生

刚一进入 20 世纪，固体物理学就开始深入到微观领域，人们开始利用微观概念总结微观规律来计算实验观测量。经过二十几年的时间，在金属电导理论、晶体的微观模型、晶格振动理论、固体的磁性理论等方面都取得了重要的进展。尽管上述理论仍然是经典或半经典的唯象理论，但我们有理由认为固体物理学作为一门学科在物理学领域中诞生了。

13.3.1　金属电子论

1.经典电子论（1900—1926）

20 世纪以前，人们已经掌握了有关金属导电的一些经验规律（如欧姆定律、维德曼–夫兰兹定律等），分子运动论在处理理想气体问题上获得了很大的成功，1897 年 J.J 汤姆生发现电子。基于这些事实，1900 年特鲁德为了解释金属的特性提出了能够利用微观概念计算实验观测量的第一个固体理论模型——特鲁德自由电子气模型。

特鲁德把金属中的电子看成自由电子气，并服从玻尔兹曼统计，这一理论成功地证明了欧姆定律和魏德曼–夫兰兹经验规律。他通过引入电子平均自由程的概念，借助分子运动论计算出了电子的热导率

$$\kappa = \frac{\pi^2}{3} knl\upsilon$$

式中 k 是玻尔兹曼常数，l 是平均自由程，n 是电子密度，v 是电子的速度。同时他得出的电导率为

$$\sigma = \frac{e^2}{kT} nl\upsilon$$

于是电导率与热导率之比

$$\kappa / \sigma = 3(k/e)^2 T$$

即为与实验一致的维德曼–夫兰兹定律。

特鲁德模型尽管经过改进，但由于其基础是经典的，因此无法单独确定热导率和电导率，不能说明电子平均自由程较长和电子对比热贡献小等实验现象。

2.半经典电子论

1925 年，泡利提出不相容原理，1926 年出现了费米–狄拉克量子统计，1927 年 9 月索末菲抛弃了特鲁德模型中的玻尔兹曼统计，提出了金属的半经典电子论，认为金属中的电子是服从费米–狄拉克量子统计的简并电子气，由此得出了费米能级，费米面等一系列重要概念并成功地解决了

电子比热比经典值小等经典模型所无法解释的问题。但是索末菲只是采用了量子统计方法，其理论的出发点仍然是经典的，因此未能解决霍耳系数随温度或磁场变化这一问题；也没有说明为什么霍耳系数会有正负的不同；未能解释电阻与温度的关系……，甚至不能说明为什么金属中的电子是自由的这一他们模型中所采用的最基本假设的合理性。

13.3.2　晶格振动理论

1819 年杜隆–珀替根据大量固体的热宏观量实验数据总结出一条经验规律：在高温情况下，固体（实际是绝缘体）的比热是一个与温度无关的常数（约为 3R）。19 世纪根据经典统计规律，对杜隆–珀替定律做出了如下解释：每克原子固体有 3N 个振动自由度，按照能量均分定理，每个自由度平均热能为 kT。那么克原子热容量为 3Nk=3R。这是把热容量和原子振动具体联系起来的一个重要成就。但是，进一步的实验发现，在低温情况下，热容量偏离了这个规律，而是随着温度的下降而下降，当 T=0K 时，比热 $c_v=0$。

1907 年，爱因斯坦为了解决上述矛盾，发展了普朗克的量子理论，首次提出了量子的热容量理论，爱因斯坦利用假设晶体中所有原子的振动相互独立，但频率相同的简单模型，得出热容量随温度下降而下降，并在 T→0K 时趋于 0 的结果。这项工作的成就对量子理论的发展起了重要的作用，把晶格振动与固体热容量联系起来，有力地推动了晶格振动的研究。但是，按照这一结果，热容量是随温度而以指数方式趋于零的，与实验结果（$C_v\sim T^3$）不符，其原因在于他的模型过于简单了（参看第七章§7.4）。

1912 年，德拜为了克服爱因斯坦所遇到的困难，从另一观点来处理问题，认为低频振动对比热的贡献不能忽略。低频振动产生的波其波长很长，因此他把晶体看成是各向同性的连续介质，把晶格振动看成是连续介质中传播的弹性波，其理论结果是：在低温情况下，比热与温度的三次方成正比，即德拜定律。这是与实验符合得很好的结果。

在德拜研究比热与晶格振动关系的同时，玻恩和冯·卡门(T.v.Karman)正在建立和求解简单晶格的动力学方程，引入周期性边界条件（玻恩–卡门条件）后得到了色散关系的ω^2规律，为晶格动力学理论的建立和发展做出了巨大的贡献。

13.3.3　晶体结构

1912 年，劳厄提出了一个非常卓越的思想：既然晶体的相邻原子间距和 X 射线波长是相同数量级的，那么 X 射线通过晶体就会发生衍射。当时，曾在伦琴实验室内研究过 X 射线的弗里德里希和尼平着手从实验上证实劳厄的思想，他们把一块亚硫酸铜晶体放在一束准直的 X 射线中，而在晶体后面一定距离处放置照相底片。他们发现，当晶轴与 X 射线同向时，底片上出现规则排列的黑点，排列的形状与晶体光栅的几何形状

有关。他们的实验初步证实了把晶体结构看成是空间点阵的正确性。对于晶体 X 射线衍射现象的解释，应当主要归功于布拉格父子的工作。按照他们的看法，X 射线在晶体中被某些平面所反射，这些平面可以是晶体自然形成的表面，也可以是点阵中原子规则排列形成的任何面。这些“原子平面”互相平行，平面间距决定了一定波长的 X 射线发生衍射的角度。分析晶体衍射图样，就可以确定晶体内部原子的排列情况。

劳厄与布拉格父子开创性的工作已成为晶体结构分析的基础，是固体物理学发展史中一个重要的里程碑。它证实了布拉菲提出的晶体空间点阵学说，使人们建立了正确的晶体微观几何模型。为正确认识晶体的微观结构与宏观性质的关系提供了基础。后来又发展了多种 X 射线结构分析术，电子衍射、离子衍射、中子衍射等技术，使人们对固体的结构很快就取得了详细的认识。人们常常把这项重要工作看成是近代固体物理学的一个开端。

13.3.4　固体的磁性

1905 年法国物理学家朗之万首先根据磁矩在磁场中的取向现象对物质的顺磁性进行了系统的理论分析，提出了顺磁性理论。他指出，顺磁性是物质原子固有磁矩在外磁场中取向排列的结果。原子的固有磁矩来源于核外未满壳层中电子的轨道角动量和自旋角动量，无外磁场时，热运动使磁矩取向无序；有外磁场时，磁矩受力矩的作用而向外磁场方向靠拢，其取向程度与外磁场强度及热运动有关。在一定的场强下，当温度升高时热运动加强，磁矩沿外场方向的取向度下降，宏观磁性减弱，所以顺磁性随温度的升高而减小。朗之万的理论成了顺磁性理论的重要基础，其中一些基本概念在很大程序上仍然保留在现代磁性理论中。

1907 年，法国的另一个物理学家外斯(P.Weiss)的工作对铁磁性的理论发展起了划时代的作用。他第一次明确地表述了铁磁现象的基本特性，从而决定了科学在这一领域的进一步发展。为了解释铁磁现象，外斯提出两点假设：其一是说在铁磁质内部存在着强大的等效磁场——分子场，即使无外加磁场，在分子场的作用下，其内部各区域也自发地被磁化，在较弱的外磁场下即可达到饱和。每一种铁磁性物质都有一个确定的磁性转变温度（居里温度），高于这个温度物质便失去铁磁性。其二是说铁磁性物质内部的自发磁化分为若干区域（磁畴），每一区域都自发磁化到饱和，但各区域的磁化强度方向分布紊乱，磁性互相抵消，故总体不表现出磁化。外磁场的作用是促使不同磁畴的磁化强度矢量取向一致的方向，最终铁磁体表现为宏观磁体。尽管这一理论是唯象的，没有揭示分子场的本质，提不出磁畴理论的根据，但这是最早建立的系统的铁磁理论。

§13.4　理论基础的奠定

1926年量子力学诞生，它是描述微观粒子运动规律的理论。最先把量子力学应用于固体物理的是海森伯和他的学生布洛赫(F.Bloch)。海森伯在1928年成功地建立了铁磁性的微观理论；布洛赫在同年也开创性地建立了固体的能带理论。他们卓越的成就震动了当时的整个物理学界。其后几年（到第二次世界大战前）世界上许多第一流的物理学家都被卷入到固体物理学的研究领域，如布里渊、朗道(Л.Д.Ландау)、莫特、佩尔斯(R.E.Peierls)、A.H.威尔逊(A.H.Wilson)、赛兹(F.Seitz)、威格纳(E.P.Wign—er)、夫伦克尔(Я.И.Френкель）等等，他们所作出的杰出贡献为现代固体物理的发展奠定了牢固的基础。

13.4.1　能带理论与电子的输运性质

固体能带论是固体物理学中最重要的基础理论，它的出现是量子力学、量子统计理论在固体中应用的最直接、最重要的结果。能带论成功地解决了索末菲半经典电子理论处理金属所遗留下来的问题，为其后固体物理学的大发展准备了条件。

1926年布洛赫在瑞士的苏黎士读大学时非常幸运地参加了薛定谔第一次关于他的波动力学的报告会，了解了微观粒子的运动规律。1927年秋他到莱比锡大学海森伯处进修。1928年初海森伯认识到量子力学可能在固体的研究中结出丰硕成果，他为布洛赫提出了两个急待解决的问题，一个是铁磁性理论，揭示外斯分子场理论的实质；另一个是金属电导理论，探讨特鲁德和索末菲理论所不能解决的问题。布洛赫选择了后一个，海森伯解决了前一个。

当时布洛赫非常了解经典电子论及半经典电子论的成功和困难。他敏感地看到，尽管索末菲用量子统计代替了特鲁德的玻尔磁曼统计，但他保留了理想自由电子气的假设，所以不能真正解释电子长平均自由程，电阻与温度有关等问题。布洛赫抓住了关键：电子是在离子间运动的，所以不能忽略离子的影响而看成自由电子，并决定在博士论文中解决这一难题。

一开始，布洛赫就准备从电子波动性去寻找答案，物理图象的启发来自海特勒(W.H.Heitler)、伦敦(F.W.London)和洪德(F.Hund)对分子中电子特性的论述，以及耦合摆运动的迁移现象（波的传播）。数学上他采用传统的傅里叶展开法来处理最简单的一维单原子周期势场中的电子运动问题。他发现薛定谔方程的解与自由电子德布罗意波的解差一个周期性的调幅因子：

$$\psi_k(x) = e^{ikr} u_k(x)$$

其中

$$u_k(x) = u_k(x + na)$$

这里 n 为任意整数、a 为一维单原子链中的原子间距（晶格常数），e^{ikr} 描述平面波，$u_k(x)$是平面波的调幅因子。布洛赫开始并没有完全理解这个结果的意义，而是先告诉了海森伯，海森伯兴奋地说：“这就是问题的答案”。这一理论可以概括为在周期性势场中运动的电子波函数具有调幅平面波的形式，调幅因子是与晶格周期性相同的周期函数，被命名为布洛赫定理，这种电子的波函数称为布洛赫函数。这一理论为现代固体理论奠定了基础，长期以来很多固体物理难解之谜在几年之内都迎刃而解。下面举数例加以说明。

(1)对金属电阻率的计算。由于理想周期晶格中的电子波函数是遍布整个晶体中的扩展态，所以平均自由程为无穷大，电阻为零，实际金属的电阻应来自电势场的不规则性，电阻与温度的关系必须考虑离子的热振动。布洛赫第一次提出波包在电场中被加速的概念，然后考虑电子与晶格振动的相互作用。经过详细的推导，他成功地得到了在高温情况下，电阻率与温度成正比；在低温情况下，电阻率与温度的 5 次方成正比的结果。这样就解决了这一长期使物理学家为难的问题。

(2)金属中电子输运过程的另一个奇异现象是正霍尔系数，从 1879 年开始，人们就企图解开这个谜，利用经典或半经典电子论不可能给予正确的解释。1927 年佩尔斯利用能带模型比较容易地给出了清晰的物理解释：波矢 k 在($\pi/2a$，π/a)范围内，霍尔系数是正的。

(3)如果说在布洛赫定理提出之前理解金属是困难的话，那么在此之后迫切需要回答的是什么是绝缘体。这个问题在当时似乎已经解决了，人们，包括布洛赫本人都理所当然地认为绝缘体只是不良导体，而不是非导体。金属和绝缘体之间只有量的差别，电阻率大小的差别，没有质的差别。1931 年，英国物理学家 A.H.威尔逊对这个概念提出了挑战。依据能带理论，他成功地解释了金属、绝缘体和半导体的差别。

经过布洛赫、佩尔斯、A.H.威尔逊、布里渊等物理学家的努力，逐渐建立了完整的固体能带理论。根据这个理论，晶体中电子的允许能级形成能带，这既不象孤立原子中的分立能级，也不象无限空间中自由电子的连续能级，而是由准连续的能级构成的。相邻两个能带之间的能量范围称为禁带。在绝对零度，被电子填充满的能量最高的电子能带称为价带，通常价带中的电子对应于组分原子的价电子。在能带之上，部分被电子占据的能带称为导带。完全没有被电子占据的能带称为空带。金属中存在着不满带（导带），其中的电子可以导电，所以是良导体；绝缘体中没有不满带，所以不能导电；半导体在 T=0K 时，能带填充情况与绝缘体相同，其差别在于禁带宽度 E_g，半导体 $E_g<2eV$，$T\neq0K$ 时，依靠热激发把满带的电子激发到空带（从而使其变为导带），于是有了导电能力，称为半导体。

能带论中另一个值得介绍之处是对于费米面的认识。贝特在利用布

洛赫的理论研究电子在布里渊区中的填充情况时首先提出了费米面的概念，当时称为“波数空间的等能面”。从那以后，人们开始认识到费米面是一种真实存在的物理实体，通过在其附近电子对固体一些重要物理性质的决定性作用，认识了费米面的重要性。

布洛赫用单电子独立运动的量子描述解释固体导电性。这一开创性的工作带动了固体量子论的深入发展。1928 年以后，人们逐渐开始着手处理固体中粒子相互作用问题，使得单电子近似下的能带理论更加深入和完善。1931 年，弗伦克尔考虑电子和空穴的相互作用，提出绝缘体和半导体中激子的概念。同年，布洛赫首次提出固体中集体运动模式，引出了自旋波的概念。1934 年赛兹和威格纳研究了电子间的相互作用，并计算了碱金属的结合能。随后，很多能带计算方法，如正交化平面波法，缀加平面波法等相继提出，特别是后来计算技术的发展使人们能实际计算材料的能带。1936 年赫尔曼提出赝势(pseudopotential)的概念。1937 年巴丁(J.Bardeen)研究了金属中电子–声子相互作用时电子对离子运动的散射问题。

1928 年布洛赫定理创立之后，首先在现代固体量子理论和磁性量子理论中出现了史无前例的大发展，在电子–电子、电子–声子、电子与其它固体元激发的相互作用等方面都开始成为重要的研究领域，固体物理学作为一个独立学科开始在物理学中产生和完善起来。

30 年代初，关于固体电子结构的实验研究也有广泛的发展。布洛赫定理一方面解释了很多实验现象，另一方面也为实验提出了新的研究课题，1928 年后短短的几年中，由于现代固体量子理论与固体物理实验的结合，带来了固体物理学的大发展。下面选择两个有代表性的实验加以说明。

金属能带结构的主要特征在于有明确的费米面。历史上第一次用实验方法确定固体费米面的是英国物理学家肖恩堡(D.Shoenberg)。1930 年德哈斯(W.J.deHaas)和范·阿尔芬(F.M.van Alphen)发现在磁场变化的情况下，处在低温的铋单晶磁化率随磁场强度的单调增加而发生振荡式的变化，在此前人们也发现金属电导率、比热、热电势等物理量也有类似的振荡现象。人们逐渐认识到这些现象与金属费米能级附近电子在外场中的行为有关，因而同金属的费米面结构有关，人们希望通过研究费米面附近电子的行为来描绘费米面的形状。

1937 年,年轻的肖恩堡来到莫斯科,在卡皮查(П.Л.Капица)的指导下进行了铋单晶的磁致伸缩效应的研究，在低温下测量铋单晶的磁化率随磁场的变化，发现了明显的德哈斯–范·阿尔芬效应。非常巧，当时朗道也刚刚完成了关于铋单晶量子振荡的理论计算，及时地把他的结果告诉了肖恩堡。经过几个月的努力，肖恩堡终于运用朗道提出的“三椭球模型”成功地解释了实验结果，第一次用实验方法测定了铋单晶的

费米面。他的工作大大促进了人们对固体电子结构的认识，很多金属、半导体等材料的费米面被实验确定，这不仅大大促进了人们对材料能带结构的认识，也大大加深了人们对固体中电子行为的了解。

30 年代初期发展的研究固体能带结构的一种实验方法是 X 射线谱。我们知道，阴极射线可以激发原子的内层电子，从而产生内层空能级，外层电子填充这些空能级时，发射出 X 光子。固体价电子的能带在 X 射线发射中表现为连续带,X 射线发射谱的强度决定于能态密度和发射几率的乘积，因此，发射谱能比较直接地反映价电子能带的能态密度情况。

1932 年斯京纳(H.W.B.Skinner)等人用软 X 射线发射谱研究了钾、钠、镁等轻金属的能带结构。他们发现，在发射谱的低能方面，都是逐渐上升的，这反映了能带价带底随电子能量增加，能态密度逐渐增大；但在高能端金属的发射谱陡然下降，这表明金属中的电子不是正好填满一个能带，对于最高能量的电子能态密度不为零。Mg 的 X 射线发射谱最引人注意的是在高能端出现很明显的峰，这个峰反映了镁晶体具有能带交迭现象，这些实验结果都和能带理论计算所得结果一致。

13.4.2　固体磁性量子理论的建立

外斯在 1907 年提出的分子场理论相当成功地描述了铁磁体的磁特性，但是，这个理论是唯象的，不能说明分子场的本质。1928 年海森伯提出用量子力学来解释铁磁性，最早建立了以局域磁矩为基础的交换相互作用理论。这个理论给出下面几个主要结果：(1)分别具有自旋 S_i 和 S_j 的原子 i 和原子 j 之间的相互作用能包含一项 $u=-2j_eS_i\cdot S_j$，其中 J_e 是交换积分，决定于两个原子轨道的重迭，这就是两个原子交换能的表达式，也叫海森伯模型。(2)铁磁性分子场来源于电子间的交换作用。(3)交换积分 $J_e>0$ 将导致铁磁性，$J_e<0$ 则导致反铁磁性。

海森伯根据他的磁性量子理论最先认识到交换能大于零时，自旋平行的状态是能量较低的状态。磁畴中自旋磁矩自发趋于平行排列是由铁磁体中相邻原子间的交换作用引起的。以前把分子场当作磁相互作用等效场，难于理解其强度为什么能高达 10^7 高斯。利用海森伯理论，这一事实可得到很好的解释。

海森伯的学生布洛赫在完成能带理论及金属电导理论的研究工作之后，也转入磁性量子理论的研究领域，1929 年提出金属中自由电子气在一定条件下可能产生铁磁性。后来通过斯通纳(E.C.Stoner)、斯莱特(J.C.Slater)的继续努力，形成了巡游电子模型。1931 年布洛赫又提出自旋波的概念，进一步发展了磁性理论。

对磁学做出贡献的还有法国物理学家奈耳(L.E.F.Neel)，1932 年他发现了反铁磁性，这是由于在同一种材料中有两种不同的铁磁亚点阵引起的，虽然每一个亚点阵的磁性都很强，但由于两套亚点阵的磁化方向相反，从整体上看，它们的铁磁性大部分互相抵消了。16 年后奈耳又发

现了亚铁磁性，并成功地作出了解释。由于在磁学方面的基本研究成就，奈耳在 1970 年获诺贝尔物理奖。

第二次世界大战以后，固体物理学在 30 年代奠定的基础上进一步发展，结出了丰硕果实。其中最大的硕果就是发明了晶体管。又由于晶体管的研制推动了半导体物理和半导体技术的迅猛发展。另一方面，固体物理学的基础理论在继续巩固的同时，也不断长出新的分支。例如：超导电性理论的建立和高温超导材料的研究导致了超导物理学的发展；无序结构的研究生长出一门崭新的学科——非晶态物理，等等，下面仅就这几个方面略作介绍。

§13.5　晶体管的发明

晶体管的发明是固体物理学理论指导实践的产物，也是科学家长期探索的结果。

早在 19 世纪中叶，半导体的某些特性就受到科学家的注意。法拉第观察到硫化银的电阻具有负的温度系数，与金属正好相反。史密斯(W.Smith)用光照射在硒的表面，发现硒的电阻变小。1874 年，布劳恩(F.Braun)第一次在金属和硫化物的接触处观察到整流特性。1876 年, 亚当斯(W.G.Adams)和戴依(R.E.Day)发现硒的表面会产生光生电动势。

1879 年，霍尔(E.H.Hall)发现（后来以他的名字命名的）霍尔效应。对于金属，载流子是带负电的电子，这从金属中的电流方向所加磁场的方向以及霍尔电位差的正负可以作出判断。可是，也有一些材料显示出正载流子而且其迁移率远大于正离子，这正是某些半导体的特性。可是，所有这些特性——电阻的负温度系数、光电导、整流、光生电动势以及正电荷载流子，都无法得到合理的解释。在 19 世纪物理学家面前，半导体的各种特性都是一些难解之谜。

然而，在没有揭示其导电机理之前，半导体的某些应用却已经开始了，而且应用得还相当广泛。

1883 年，弗立兹(C.E.Fritts)制成了第一个实用的硒整流器。

无线电报出现后，天然矿石被广泛用作检波器。

1911 年,梅里特(E.Merritt)制成了硅检波器,用于无线电检波。1926 年左右，锗也用于制作半导体整流器件。这时，半导体整流器和光电池都已成为商品。人们迫切要求掌握这些器件的机理。然而，作为微观机制理论基础的量子力学，这时才刚刚诞生。

电子管问世之后，获得了广泛的应用。但是电子管体积大、耗电多、价格昂贵、寿命短、易破碎等缺点，促使人们设法寻找能代替它的新器件。早在 1925 年前后，已经有人在积极试探有没有可能做成象电子管一样，在电路中起放大作用和振荡作用的固体器件。

人们设想，如果在半导体整流器内“插入”一个栅极，岂不就能跟三极真空管一样，做成三极半导体管了吗？可是，如何在只有万分之几厘米的表面层内安放“栅板”呢？

1938 年，德国的希尔胥(R.Hilsch)和 R.W.波尔(R.W.Pohl)在一片溴化钾晶体内成功地安放了一个栅极。可惜，他们的“晶体三极管”工作频率极低，只能对周期长达 1 秒以上的信号起作用。

在美国贝尔实验室工作的布拉坦(W.H.Brattain)和贝克尔(J.A.Becker)1939 年和 1940 年也曾多次试探实现固体三极管的可能性，都以失败告终。成功的希望在那里？有远见的人们指望固体物理学给予理论指导。

话题又要回到理论工作方面。上节我们说过，A.H.威尔逊在 1931 年提出了固体导电的量子力学模型，用能带理论能够解释绝缘体、半导体和导体之间的导电性能的差别。接着，他在 1932 年，又在这一基础上提出了杂质（及缺陷）能级的概念，这是认识掺杂半导体导电机理的重大突破。

1939 年，苏联的达维多夫(А.С.авыдов)、英国的莫特、德国的肖特基(W.Schottky)各自独立地提出了解释金属–半导体接触整流作用的理论。达维多夫首先认识到半导体中少数载流子的作用，而肖特基和莫特提出了著名的“扩散理论”。

至此，晶体管的理论基础已经准备就绪，关键在于如何把理论和实践结合在一起。1945 年 1 月在美国贝尔实验室成立的固体物理研究组出色地做到了这一点。

上面提到的布拉坦就是这个组的成员之一。他是实验专家，从 1929 年起就在贝尔实验室工作。另有一位叫肖克利(B.Shockley)是理论物理学家，1936 年进入贝尔实验室。

1945 年夏，贝尔实验室决定成立固体物理研究组，其宗旨就是要在固体物理理论的指导下，“寻找物理和化学方法，以控制构成固体的原子和电子的排列和行为，以产生新的有用的性质”。这个组共有 7 人，组长是肖克利，另外还有半导体专家皮尔逊(G.L.Pearson)、物理化学家吉布尼(R.B.Gibney)、电子线路专家摩尔(H.R.Moore)。最关键的一位是巴丁(J.Bardeen)，他也是理论物理学家，1945 年刚来到贝尔实验室，是他提出的半导体表面态和表面能级的概念，把半导体理论又提高了一步，使半导体器件的试制工作得以走上正确的方向。

贝尔实验室的另外几位专家：欧尔(R.S.Ohl)和蒂尔(G.K.Teal)等致力于硅和锗的提纯并研究成功生长大单晶锗的工艺，使固体物理研究组有可能利用新的半导体材料进行实验。

肖克利根据莫特–肖特基的整流理论，并且在自己的实验结果之基础上，作出了重要的预言。他认为，假如半导体片的厚度与表面空间电荷

层厚度相差不多，就有可能用垂直于表面的电场来调制薄膜的电阻率，从而使平行于表面的电流也受到调制。这就是所谓“场效应”，是以后的场效应管的理论基础。可是，当人们按照肖克利的理论设想进行实验时，却得不到明显的效果。后来才认识到，除了材料的备制还有缺陷之外，肖克利的场效应理论也还不够成熟。

表面态的引入，使固体物理研究组的工作，登上了一个新的台阶。他们测量了一系列杂质浓度不同的 p 型和 n 型硅的表面接触电势，发现经过不同表面处理或在不同的气氛中，接触电势也不同，还发现当光照射硅的表面时，其接触电势会发生变化。接着，他们准备进一步测量锗、硅的接触电势跟温度的关系。就在为了避免水汽凝结在半导体表面造成的影响，他们把样品和参考电极浸在液体（例如可导电的水）中时意外的情况出现了。他们发现，光生电动势大大增加，改变电压的大小和极性，光生电动势也随之改变大小和符号。经过讨论，他们认识到，这正是肖克利预言的“场效应”。

巴丁提出了一个新方案，如图 13–1。他们用薄薄的一层石蜡封住金属针尖，再把针尖压进已经处理成 n 型的 p 型硅表面，在针尖周围加一滴水，水与硅表面接触。带有蜡层的针同水是绝缘的。正如他们所预期的，加在水和硅之间的电压，会改变从硅流向针尖的电流。这一实验使他们第一次实现了功率放大。后来，用 n 型锗做实验，效果更好。然而，这样的装置没有实用价值，因为水滴会很快被蒸发掉。由于电解液的动作太慢，这种装置只能在 8 赫以下的频率才能有效地工作。

■图 13–1 功率放大效应的实现

他们发现，在电解液下面的锗表面会形成氧化膜，如果在氧化膜上蒸镀一个金点作为电极，有可能达到同样的目的。然而，这一方案实现起来也有困难。

最后，他们决定在锗表面安置两个靠得非常近的触点，近到大约 5×10^{-3} 厘米的样子。而最细的导线直径却有 10×10^{-3} 厘米。实验能手布拉坦想出了一条妙计。他剪了一片三角形的塑料片，并在其狭窄而平坦的侧面上牢固地粘上金箔。然后用刀片从三角形塑料片的顶端把金箔割成两半。再用弹簧加压的办法，把塑料片和金箔一起压在锗片上。于是，他做成了世界上第一只能用于音频的固体放大器。他们命名为晶体管 (transistor)。这一天是 1947 年 12 月 23 日。以上就是接触型晶体管诞生的经过。

接着，肖克利又想出了一个方案。他把 n 型半导体夹在两层 p 型半导体之间。1950 年 4 月根据这一方案做成了结型晶体管。

晶体管的发明，是电子学发展的一个重要里程碑。

§13.6　半导体物理和实验技术

的蓬勃发展

半导体基础理论和实验技术的研究在阐明半导体微观结构和宏观性质方面所取得的杰出成就使得半导体物理成为现代固体物理学最活跃的研究领域之一。

13.6.1　1960 年以前半导体单晶材料及半导体物理的发展

在发明晶体管时，只有中等纯度的多晶材料，无论是基础研究还是晶体管性能的改进都需要纯度高、完整性好的晶态半导体材料。第一个锗单晶的生长工作是蒂尔和李特尔(Little)完成的，这就使得制造出结型晶体管成为可能。结型晶体管的问世大大促进了半导体工业的出现。虽然人们从理论上认识到硅应该比锗好，但是由于硅的提纯更加困难，第一批硅晶体管直到 1954 年才出现。60 年代初发明了平面晶体管，正是这一重大发现，开辟了通往现代集成电路的道路。

60 年代以前半导体的发展经历了如下步骤：

1947—1948 年	点接触型晶体管
1949 年	单晶生长，区域提纯
1950 年	结型晶体管
1952 年	晶体管助听器，收音机等
1954 年	硅晶体管
1960 年	平面晶体管技术

上述半导体器件和技术所取得的成就，主要依赖于高质量的半导体材料，而研制优质的单晶又有力地推动了半导体材料工艺、区域提纯、掺杂控制、平面工艺等技术的发展，使得锗和硅单晶成为纯度最高、结晶完整性最好、品质鉴定得最清楚的固体材料。由于有这些技术和材料，才使固体物理学家的很多理论设想有可能在实验中得到体现。50 年代初海纳斯(Haynes)等人发表了著名的漂移迁移率实验，直接观察到了空穴的注入和运动，对能带理论给出了有决定意义的肯定和支持。皮尔逊等用磁阻实验第一次测定了 Ge 和 Si 的具体能带结构。1955 年德累塞豪斯(Dresselhause)用回旋共振实验方法进一步研究了 Ge、Si 能带结构的很多细节。光吸收的方法在研究禁带宽度、直接跃迁、间接跃迁过程也发挥了很重要的作用，这些重要实验不仅为深入认识半导体的电子结构提供了条件，而且也揭示了大量半导体的物理性质。在晶体管的发展过程中，非常好地体现了理论与实验之间相辅相成的关系。实验促进了理论的发展，能带理论得到令人信服的验证，新的物理概念不断涌现。60 年代以前在半导体物理学中出色的理论成果有：肖克利小组以固体能带论为理论基础，发明了点接触型晶体管，并在 1949 年根据能带论的基本思想创立了 p–n 结理论，发明了结型晶体管，为半导体事业的飞跃发展奠定了基础。1958 年日本物理学家江崎对一种特殊掺杂分布的 p–n 结二极

管的正向特性用量子隧道效应从理论上作出了精辟的说明。在实验中江崎发现，用高浓度材料制成的狭窄 p—n 结的伏安特性同一般晶体管不同，在加反向偏压时，电流很快增加；在加正向偏压时，开始电流增加很快，达到峰值后下降，形成一个负阻区。江崎用量子力学的隧道效应对这种反常伏安特性所作的解释不仅在理论上带来了突破性的进展，而且导致了隧道二极管的发明和使用。江崎因此而获得诺贝尔物理奖。

13.6.2　1960 年以后半导体器件的小型化和集成化进一步促进了半导体物理的发展

60 年代初，人们在晶体管发展的基础上发明了集成电路，这是半导体发展中的一次飞跃。它标志着半导体器件由小型化开始进入集成化时期。所谓集成电路指的是把二极管、三极管（晶体管）以及电阻、电容都制做在同一个硅芯片上，使一个片子所完成的不再是一个晶体管的放大或开关效应，而是具有一个电路的功能。60 年代出现了在一块硅芯片上（通常面积小于 1 厘米^2）包含几十个晶体管的小规模集成电路；随着硅平面工艺的突破和进展，70 年代集成度大大提高，发展了包括几万个晶体管的大规模集成电路。集成电路的发展使电子器件的成本大大降低，1976 年的成本只有 1956 年的十万分之一。所以半导体电子设备深入到社会各个角落，并且使人类社会从工业社会发展到信息社会。

半导体是一门技术性很强的科学，特别是小型化、集成化对材料质量的极高要求，有力地促进了超纯、超净、超精细加工技术的开发和发展。杂质及其含量对半导体性能有极明显的影响，例如硅中只要掺入百万分之一的磷原子，电导率就会提高 10 万倍左右。所以要严格地控制半导体中杂质的含量，这就要求发展超纯技术。灰尘不仅会在材料加工中混入而影响纯度，而且器件加工过程中沾污了灰尘会造成表面和结构缺陷以及不需要的杂质吸附，使器件性能变坏。小型化必须要求发展精细加工。现在，超纯、超净、超精细加工技术不仅推动了半导体技术的发展，而且已成为一项重要的现代科学实验技术。

半导体的小型化、集成化过程中不断地提出许多理论和基础研究课题，如由于不断小型化，器件结构越来越接近表面；而半导体器件的特性受表面影响很大，使得表面物理的研究受到了极大的重视。现在人们对表面结构、能带的弯曲、表面态的分布等进行着深入的研究。

小型化的不断前进，要求对半导体器件进行原子级加工。即人类利用现代的微加工实验手段，在精确控制的情况下，一层一层地把原子生长到材料上，也可以一个一个地把原子刻蚀剥离掉，制备预先设计好的材料和器件。最近几年发展起来的分子束外延（MBE）技术、金属有机氯化物汽相沉积（MOCVD）技术可以进行原子层级生长超晶格半导体材料，离子束刻蚀技术可以对半导体材料进行原子级刻蚀剥离。这是半导体小型化技术的一次重大革新。当样品的尺寸小于电子的平均自由程，小于

光的波长时，电子、光子在固体中的行为如何？原先的一套理论已不再适用，需要建立新的理论体系，研究新的器件设计思想，提出新的工艺方案，乃至建立新的学科。

§13.7　超导电性的研究

第二次世界大战以后，在理论和应用方面有了巨大发展的另一个主要领域是固体超导电性的研究。早在 1911 年，昂纳斯首次发现在 4.2K 水银的电阻突然消失的超导电现象。长期以来，物理学家一直致力于建立微观理论，试图定性地，直至定量地说明超导电性的本质。但是，近半个世纪屡攻不克，超导电性问题成为科学上有名的悬案。1928 年，布洛赫在提出布洛赫定理，并成功地建立了金属正常电导理论之后，马上开始解决超导问题。虽经艰苦努力，最终不但没有找到正确答案，反而得出超导电性是不可能的结论。1933 年，迈斯纳（W.Meissner）通过实验发现另一个效应，超导体内部的磁场是保持不变的，而且实际上为零。这个现象叫做迈斯纳效应。这种完全的抗磁性是超导体的一个独立于完全导电性的又一个基本特性。从昂纳斯到迈斯纳 20 多年的时间内，人们一直认为超导体只不过是电阻为零的理想导体。而完全抗磁性的发现，使人们认识到超导态是一个真正的热力学态。完全导电性和完全抗磁性是超导体的两个基本特性。1934 年，戈特（C.J.Gorter）和卡西米尔（H.B.G.Casimir）为了解释超导电现象提出了二流体模型。这个模型认为：金属内部有两种流体即正常流体和超导流体。它们的相对数量随温度和磁场而变化。正常流体导电性与金属中电子气相同，而超导流体在晶格中运动完全自由，畅通无阻。低于超导转变温度，所有电子都凝聚到超导态了。这个模型可以解释超导体的电子比热实验和直流电阻为零的实验现象。1935 年，伦敦兄弟（F.London，H.London）提出了描述超导体的宏观电动力学方程——伦敦方程。他们认为超导体内有两部分电子：正常电子和超导电子。正常电子服从欧姆定律。超导电子运动服从伦敦方程，利用伦敦方程可以解释超导体的完全抗磁性。在伦敦方程的基础上，还有人提出了一系列理论处理，例如金茨堡–朗道方程（1950 年）和皮帕德方程。虽然这些理论都在伦敦方程基础上有一定的改进，但是它们都是唯象理论。

第二次世界大战结束后，超导方面的研究又开始蓬勃发展。1950 年，弗留里希（H.Frölich）首先给出了解决超导微观机制的一个重要线索。他认为电子–晶格振动之间相互作用导致电子之间相互吸引是引起超导电性的原因。这种相互作用可以这样设想，当一个电子经过晶格离子时，由于异号电荷的库仑吸引作用，会在晶格内造成局部正电荷密度增加。这种局部正电荷密度的扰动会以晶格波的形式传播开来，它会影响一个

电子。在一定条件下，两个电子通过晶格便实现相互吸引。就在同一年（1950 年），麦克斯韦（E.Maxwell）和雷诺（Reynold）等人同时独立发现，超导的各种同位素的超导转变温度 T_c 与同位素原子质量M之间存在下列关系：$T_c \propto M^{-\alpha}$，对一般元素 $\alpha \sim \frac{1}{2}$。这叫同位素效应。这个实验结果的发现肯定了超导电性与晶格振动有关。也就是说电子与声子的相互作用是决定超导转变的关键性因素。1956 年，库柏（L.N.Cooper）利用量子场论方法，经过理论处理得到两个动量和自旋都大小相等而方向相反的电子能结合成对。这种电子对后来被称为库柏对。电子对能量比费米面能量略低一些，形成所谓超导能隙。库柏电子对的概念获得很大成功，次年（1957 年），巴丁、库柏和施里弗（J.R.Schrieffer）根据基态中自旋方向和动量方向都相反的电子配对作用，共同提出了超导电性的微观理论：当成对的电子有相同的总动量时，超导体处于最低能态。电子对的相同动量是由电子之间的集体相互作用引起的，它在一定的条件下导致超流动性。电子对的集体行为意味着宏观量子态的存在。这一超导的微观理论称为 BCS 理论，1972 年他们三人共同获得了诺贝尔物理学奖。拖延了半个世纪之久的物理学悬案终于被攻克了。BCS 理论最突出的成果是约瑟夫森效应的发现。1962 年，英国剑桥大学的研究生约瑟夫森（B.D.Josephson）根据 BCS 理论计算出，由于量子隧道的作用，可以有一直流电流通过两个超导金属中间的薄的绝缘势垒，而且这个电流的大小应当正比于阻挡层两侧超导体之间位相差的正弦。这个效应称为直流约瑟夫森效应。他还指出，当势垒两边施加直流电压 V 时，会有交流电流通过势垒，其基频为 v=2eV/h，其数值与连接电路所用的材料无关。这个效应叫交流约瑟夫森效应。约瑟夫森的这些预言后来都被实验证实。利用这个效应制成了极其灵敏的探测器。

§13.8　高温超导的探索

自从发现超导电性以来，人们逐渐认识到超导技术有广泛应用的潜在价值，世界各国花了很大力气开展这方面的工作，但是超导转变温度太低，离不开昂贵的液氦设备。所以，从昂纳斯的时代起，人们就努力探索提高超导转变临界温度 T_c 的途径。

为了寻找更适于应用的超导材料，几十年来，物理学家广泛搜查各种元素的低温特性。除了汞、锡和铅以外，又发现铟、铊和镓也有超导特性，这些材料都是金属，而且具有柔软易熔的共同性质。后来迈斯纳把试验扩展到坚硬难熔的金属元素，又发现了钽、铌、钛和钍等金属具有超导特性。当磁冷却法应用于低温后，在极低温区（1K 以下）又找到了许多金属元素和合金有超导迹象。后来甚至知道上千种物质的超导特性，可是，它们的转变温度都在液氦温度附近或在 1K 以下。

1941 年，德国物理学家阿瑟曼（G.Ascherman）发现第一个被找到的超越液氦区的超导材料是氮化铌（NbN），其临界温度可达 15K。

1953 年，美国物理学家哈迪（G.F.Hardy）和休姆（J.Hulm）开辟了另一条新路，他们找到了四种 A–15 结构或β钨结构的超导体，其中钒三硅（V_3Si）的临界温度最高，达 17.1K。A–15 结构是一种结晶学符号，它代表的化学组成一般为 A_3B 的形式，其中铌（Nb）、钒（V）等过渡元素为 A 组元，第III或第IV主族的元素或其它过渡元素为 B 组元。

贝尔实验室的马赛阿斯（B.T.Matthais）沿着这一线索坚持了长期的探索。他和他的同事围绕 A–15 结构进行了大量实验，总结出了一些经验规律，收集了大量数据，并于 1954 年找到了铌三锡（Nb_3Sn），T_c 为 18.3K；1967 年制备了组成非常复杂的合金 $Nb_{3.8}$（$Al_{0.75}\cdot Ge_{0.25}$），T_c 为 20.5K；1973 年进一步获得铌三锗（Nb_3Ge）薄膜，T_c 提高为 23.2K。照这样的速度发展下去，人们大概可以指望将超导临界温度提高至 30K 附近的液氖区。

令人遗憾的是，他们持续的努力没有取得进一步成果。1973 年以后的 13 年，临界温度一直停滞不前。

世界上还有许多物理学家研究其他类型的超导体，诸如有机超导体、低电子密度超导体、超晶体超导体、非晶态超导体等等，其中金属氧化物超导体吸引了许多人的注意。

金属氧化物也是马赛阿斯研究的项目。1967 年他和伦梅卡（J.P.Remeika）等人共同发现了 Rb_xWO_3 的超导特性。随即休姆等人在 1968 年发现 TiO 的超导特性，不过 T_c 都在 10K 以下。1973 年约翰斯通（D.C.Johnston）发现 $Li_{1+x}Ti_{2-x}O_4$ 的 T_c 达 13.7K。

令人不解的是，金属氧化物一般都是非导体，可是某些组成都可以在低温下变成超导体，这个事实确是对现有的物理学理论的挑战。人们只有在经验的基础上摸索前进。

正是这一条朦胧不清的道路引导了缪勒（K.A.Müller）和柏诺兹（J.G.Bednorz）对高 T_c 超导体的研究作出了突破性的进展。

缪勒是国际商用机器公司（IBM）苏黎世研究实验室的研究员，物理部的负责人，他多年来一直在材料科学领域，特别是电介质方面进行卓有成效的研究。他对超导体也很熟悉，1978 年就开始作过研究，课题是颗粒超导电性。纯铝的 T_c 是 1.1K，如果铝的颗粒被氧化物层包围，颗粒系统的 T_c 可提高到 2.8K。

柏诺兹是西德年轻的物理学家，原在瑞士联邦工业大学当研究生，后来到 IBM 苏黎世研究实验室在缪勒指导下做博士论文，1982 年获博士学位，留在 IBM 从事研究工作。

从 1983 年起，缪勒和柏诺兹合作，探索金属氧化物中高 T_c 超导电性的可能性。从 BCS 理论可以作出这样的推测：在含有强的电–声耦合作用

的系统中，有可能找到高 T_c 超导材料。他们认为，氧化物符合这一条件。于是就选择了含有镍和铜的氧化物作为研究对象。在这方面他们进行了三年的研究，取得了很多经验。

其实，这方面的工作早在 70 年代就已经有人在做。他们的突破在于从金属氧化物中找到钡镧铜氧的化合物——一种多成分混合的氧化物。

1985 年，几位法国科学家发表了一篇关于钡镧铜氧（Ba–La–Cu–O）材料的论文，介绍这种材料在 300℃至—100℃的范围内具有金属导电性。正好这时缪勒和柏诺兹因实验遇到挫折需要停下来研究文献资料。有一天柏诺兹看到了这篇论文，很受启发，立即和缪勒一起对这种材料进行加工处理，终于在 1986 年 1 月 27 日取得了重要成果。

1986 年 4 月，柏诺兹和缪勒向德国的《物理学杂志》投寄题为《Ba–La–Cu–O 系统中可能的高 T_c 超导电性》的文章，他们只是说可能有，一方面是因为尚未对抗磁性进行观测，另一方面也是出于谨慎。在此之前曾有过多次教训，有人宣布“发现”了高 T_c 超导体，后来都证明是某种假象所误。

不久，日本东京大学的几位学者根据 IBM 的配方备制了类似的样品，证实 Ba–La–CU–o 化合物具有完全抗磁性。缪勒和柏诺兹随即也发表了他们的磁性实验结果，不过论文到 1987 年才问世。

一场国际性的角逐在 1987 年初展开了，柏诺兹和缪勒的发现引起了全球性的“超导热”。1987 年他们两人共获诺贝尔物理奖，在领奖演说中引用了一张图表，如图 13–2。这张图表展现了几十年来探索高 T_c 超导体的漫长历程和 1986 年 1 月到 1987 年 2 月间的突破性进展。

■图 13–2 超导临界温度的提高

§13.9　非晶态物理的发展

第二次世界大战后，在理论和实验方面有巨大发展的另一个重要领域是非晶态物理。50 年代初期，正当能带理论以压倒优势向前发展的时候，一些目光敏锐的物理学家就根据实验事实向能带论提出了挑战。能带论强调能态的延展性，用布洛赫波描述电子行为，这是由晶体结构平移对称性决定的。而挑战者强调能态的定域性，这是物质的无序结构决定的。

研究无序体系电子态的开创性工作是安德森（P.M.Ander–son）在 1958 年发表的一篇题为《扩散在一定的无规点阵中消失》的论文。他首先把无规势场和电子波函数定域化联系起来，在紧束缚近似的基础上，考虑了三维无序系统。证明当势场无序足够大时，薛定谔方程的解在空间是局域化的；给出了发生局域化的定量判据，并具体描述了定域态电子和扩展态电子的行为，为非晶态材料的电子理论奠定了重要的理论基

础。1960 年，美国加州理工学院教授杜威兹（Duwez）等人用喷枪法获得非晶态 An–Si 合金。这是制备非晶态金属和合金工艺上的重要突破。1963 年，派诺考斯基（P.Pietrokowsky）提出了活塞砧座法，用以制备非晶金属箔片。1970 年至 1973 年，陈鹤寿等人进一步发展了可连续浇铸和连续制备非晶态合金的双辊急冷轧制法和单滚筒离心急冷法。1973 年，美国联合化学公司的吉尔曼（J.J.Gilman）等人做到以每分钟两千米的高速度连续生产非晶态金属玻璃薄膜，并以商品出售。杜威兹的研究成果不仅在金属玻璃的制备上取得了显著成就，而且开拓了非晶态金属的研究领域，大批物理学家开始研究金属玻璃的形成条件，研究金属玻璃的结构与稳定性；研究和利用金属玻璃的优异物理性质，例如高强度、软磁性、抗腐蚀性、抗辐照等性能。下面以金属玻璃磁性的研究为例作简要说明。早在 1960 年库柏诺夫（A.N.Gubanov）就预言非晶态材料也具有铁磁性，并用径向分布函数计算出非晶态材料的铁磁转变温度，指出非晶态铁磁材料在不少实际应用中具有晶态铁磁材料所没有的优越性能。后来人们发现非晶软磁合金比晶态软磁合金有更优异的性能和更重要的使用价值。目前利用非晶软磁合金制作的各类磁头在日本已进入大批量的商品生产。1967—1969 年，在安德森局域化理论的基础上，莫特（N.F.Mott）、科恩（M.H.Cohen）、弗里希（H.Fritzsche）和奥弗辛斯基（S.R.Ovshinsky）提出了非晶态半导体的能带模型，称为莫特–CFO 模型。这个模型认为非晶态半导体中的势场是无规变化的，但是它的无规起伏并没有达到安德森局域化的临界值，因此电子态是部分局域化的。即非晶态半导体能带中的电子态可分为两类：扩展态和局域态。模型描述了非晶态半导体的能带结构，并进一步提出迁移率边、最小金属化电导率等概念。尽管这个模型从开始提出来就有争论，但它实际上已成为十多年来非晶态半导体电子理论的基础，对说明非晶态半导体的电学和光学性质起着重要作用。1972 年，莫特进一步提出，禁带中央的态是来自缺陷中心，也就是来自悬挂键，它们既能作为深施主，又能作为深受主，把费米能级“钉扎”在禁带中央。1975 年，安德森提出了负的相关能的概念，即当定域态上占有电子时可能引起晶格畸变，若由于晶格畸变降低的能量超过电子之间的库仑排斥能，就可能出现负的相关能。此后不久，卡斯特纳（M.Kastner）等人提出了换价对的物理图象，使得人们对硫系玻璃的电子结构及其宏观性质的关系的研究不断深入。1975 年，被人们长期认为由于非晶半导体结构无序，存在大量缺陷态，使费米能级被钉扎，进行有效掺杂很困难的这一问题终于得到了解决。斯皮尔（W.E.Spear）在硅烷（SiH_4）辉光放电中引入硼烷（B_2H_6）和磷烷（PH_3），制备出了 p 型和 n 型非晶硅，在非晶态掺杂问题上取得了重要突破。这一突破使得非晶半导体材料有可能象晶态半导体材料那样制成各种具有独特性能的半导体器件，激起了对非晶态半导体研究的新高

潮。非晶半导体应用方面目前研究最多、应用潜力最大的是非晶硅太阳能电池。这方面的开创性工作是 1976 年美国物理学家卡尔森（D.E.Carlson）制造了第一个非晶硅太阳能电池。非晶硅太阳能电池的研究为世界各国所重视。因此，制造太阳能电池的非晶硅氢合金也成为迄今为止研究得最多的非晶态半导体材料。1977 年，莫特和安德森主要以他们在非晶态物理方面的重要贡献而获得诺贝尔物理奖。

从安德森 1958 年关于无序体系电子态的开创性工作到 1976 年莫特和戴维斯合写的《非晶固体中的电子过程》一书问世；从杜威兹 1960 年用喷枪法制备出非晶合金到1976年卡尔森制造出第一个非晶硅太阳能电池，短短十几年的时间非晶态物理的研究已取得了很大的进展。但是，无论是无序理论、非晶态的微观结构和客观性能的研究、非晶态材料的开发利用都尚处在发展阶段，其前途必然繁荣似锦。

最后让我们引用巴丁的一段话作为结束：“我们可以把固体物理学的成长比喻成一棵果树的成长。这门科学的种子是在本世纪的初期播下的。后来种子发芽了，随着 1926 年量子力学的问世，幼小的树木开始迅猛地成长起来。过了一些年，树木在长到足够成熟而能够结出果实的地步。直到第二次世界大战以后，人们才第一次得到真正的收获。这棵树很快地继续成长着，长出很多新的枝条，而且每年收获的成熟果实越来越多……”。①[注]

第十四章　实验和实验室在物理学发展中的地位和作用

§14.1　实验在物理学发展中的作用

物理学是以实验为本的科学。在物理学的发展中，实验起了重要作用。什么叫实验？实验是人们根据研究的目的，运用科学仪器，人为地控制、创造或纯化某种自然过程，使之按预期的进程发展，同时在尽可能减少干扰的情况下进行观测，（定性的或定量的），以探求该自然过程变化规律的一种科学活动。

实验和观察都是搜集事实的科学实践，但两者有所不同。前者要求人们发挥主观能动作用，控制条件，改变客观状态和进程，使自然现象的变化更有利于得出规律性的认识；而后者却只是被动地等待自然界按其本来的进程发展，人们仅仅对现象进行记录和研究。可见，实验和观察是不同层次的认识手段，起着不同的作用，两者不可偏废。

实验和生产劳动也有根本区别。两者都有改造世界的任务，但目的并不相同。前者是在科学理论指导下的探索性活动，离不开理论思维和分析判断；后者以直接变革自然，增加物质财富为目的，并不要求科学成果。实验工作中有劳动成分，但它与生产物质财富的劳动有本质的不同。

在物理学的发展中，从经典物理学到现代物理学，著名的物理实验不胜枚举，从事实验工作的物理学家何止成千上万。他们置身于艰苦的实验研究之中，为推动物理学的发展努力奋斗。他们的目标是什么？对物理学的发展起了什么样的推动作用？他们的工作有何价值？纵观物理学三百余年的发展史，可以概括成如下几个方面：

一、发现新事实，探索新规律

伽利略的单摆实验和斜面实验为研究力学规律提供了重要依据；库仑通过滑板实验提出摩擦定律；胡克的弹性实验、玻意耳的空气压缩实验、波雷里的表面张力实验为物性学提供了新事实和新规律。

在电学方面可以举出更多的事例。库仑定律的验证、欧姆定律的建立、奥斯特发现电流的磁效应、伽伐尼和伏打发现动物电和化学电源、法拉第发现电解定律和电磁感应现象，无一不是通过大量实验得出的。

光的干涉、衍射、偏振以及双折射等现象也都是首先在实验中发现的，这些实验说明了光的波动性；从色散的研究到光谱学的发展，实验更是基本的认识途径，正是这一系列研究把人们带进了原子领域。

19 世纪末，经典物理学发展到了相当完善的地步，人们纷纷认为物理学已经到顶了，以后只是把常数测得再准些，向小数点后面推进而已。

然而，正是实验的新发现打破了沉闷的空气，揭示了经典物理学的严重不足。世纪之交的三大发现开拓了新的领域，把物理学推进到一个新阶段。

物理学有许多分支，汇合起来组成物理学的主干，每个分支在其发展之初，都有大量的实验为之奠基，各分支在其发展的各个阶段大多有新的实验补充新的事实，从而使各分支更加充实，更加全面。这一切说明了：实验，只有实验，才是物理学的基础。

二、检验理论，判定理论的适用范围

无庸置疑，理论是物理学的主体。理性认识源于感性认识，但高于感性认识，更具有普遍性，只有靠理性认识才能达到事物内部的规律性。然而，理论是否正确，又必须经受实践检验。实验是人们检验理论的重要手段。例如：麦克斯韦的电磁场理论以一组简洁的数学方程概括得十分优美对称，但当年却难以令人信服。直到二十多年后他预言的电磁波被赫兹的实验证实，他的学说才成为举世公认的电磁理论基础。

1905 年，爱因斯坦用光电子假说总结了光的微粒说和波动说之间长期的争论，能很好地解释勒纳德的光电效应实验结果，但是直到 1916 年，当密立根以极其严密的实验全面地证实了爱因斯坦的光电方程之后，光的粒子性才为人们所接受。

同样，德布罗意的物质波假说也是在实验发现电子衍射之后才得到肯定。

从诺贝尔物理奖的颁发可以看到人们对实验检验的评价，请看表 14–1。

表 14–1 诺贝尔物理奖颁奖年代

获奖者及其获奖内容	主要工作年代	实验检验年代	获奖年代
爱因斯坦光电子理论	1905	1916	1921
德布罗意物质波理论	1923	1927	1929
汤川秀澍介子理论	1935	1947	1949
李政道杨振宁宇称不守恒原理	1956	1956	1957
温伯格-萨拉姆-格拉肖弱电统一理	1967-1968	1973-1978	1979

实践是检验理论的客观标准。从表 14–1 可以看出，一个理论的正确性，不仅在于它能说明多少现象，也不仅在于它的自洽性，更重要的是它能否得到实验的肯定，它所作的预言，被尔后的实验证实到什么程度。

还有，理论只有一定的适用范围，这个范围往往要靠实验来确定。例如，玻意耳定律只适用于理想气体，因为勒尼奥的高气压实验证明：当气体压强增大到一定程度以后，pV 值会偏离常数。

塞曼效应固然为洛仑兹电子论提供了实验证据，用这个理论从塞曼

的观测值推算出带电微粒的荷质比，与几个月后 J.J.汤姆生从阴极射线磁偏转所得结果，数量级正好吻合。但是不久证实塞曼效应还有大量的反常现象，即所谓的反常塞曼效应，却得不到理论的解释，甚至玻尔的定态原子模型理论也无能为力。这个疑难曾困扰物理学界达二十余年之久，直到电子自旋被发现。

斯特恩–盖拉赫实验证实了空间量子化的假设，但是同时也带来了新的问题，它的结果揭示了经典理论用到原子内部会遇到无法克服的矛盾。

热辐射的能量密度可以用经典理论计算，计算结果与热辐射计的测量基本相符，但是进一步改进实验方法，卢梅尔–普林舍姆实验证明在高温长波方面理论与实验之间有系统偏差。只有引进量子假说，才能完满地作出解释。

理论与实验是物理学的两大部分，相辅相成，缺一不可。强调实验的作用，丝毫也没有贬低理论的地位。

三、测定常数

在物理学的发展中，大量实验是围绕常数进行的。了解物质的物理特性要通过实验测量跟物质特性有关的各种常数，这方面固然重要，而基本物理常数的测定和研究，在物理学发展史中更占有极其重要的地位。例如：万有引力常数的数值，自牛顿发现万有引力定律以来，一直是人们力求测出和测准的对象。这个常数究竟是不是常数？会不会随时间变化？到现在还是物理学界关心的问题。焦耳测热功当量，历时三四十年，用了多种方法，得到大量数据，为热力学第一定律的建立提供了确凿的依据。这个常数现在已不列为基本常数，但它的历史意义是不可抹杀的。光速是测得最准的基本物理常数之一，人们不会忘记迈克耳孙的功绩，真空中的光速可以测得这样准，以至于被人们定成精确值，并由此定义长度单位——米，从而把时间单位和长度单位统一在光速这样一个基本物理常数上。

光以确定的有限速度传播，这一发现曾对光的电磁波理论起积极作用。从电磁波理论可以根据介电常数和磁导率计算光速，计算值和理论值吻合得相当好，对光的电磁波理论是一重要论据。当年麦克斯韦就是这样论证自己的理论的。

常数之间的协调是检验物理理论的重要途径，从玻尔原子模型理论最初的论证可以找到范例。经这个理论比较不同渠道得到的里德伯常数，在实验误差范围内基本相符，说明了理论的自洽性。

四、推广应用，开拓新领域

如果说蒸汽机的发展超前于热学理论，电机和电气工业的发展，则完全是在电磁理论建立之后，人们自觉运用理论作出各种发明与发现的。然而，不论是蒸汽技术还是电工技术都离不开实验，其中包括许多

热学实验、物性学实验和电磁学实验。各种发明创造，诸如杜瓦瓶、致冷机、电灯、电报等等，无不是经过大量实验研究才逐渐完善的。

进入二十世纪，无线电电子学异军突起。从电子管到晶体管，从无线电报到雷达，哪一项发明创造不是实验室的产物！科学理论通过实验这一中间环节，不断起着改造世界的作用，包括补充和改造科学理论自身。

在物理学工作者中，从事实验的有 90%以上。他们工作在各个方面，从光谱学到激光技术，从电子显微镜到扫描隧道显微镜，从低温技术到超导研究，无不凝聚了实验物理学家的心血。

总之，提供事实、验证理论、测定常数、推广应用这四个方面基本上概括了实验在物理学发展中的作用。正如我国著名物理学家张文裕教授在论述实验的作用时所指出的[①]：

“科学实验是科学理论的源泉，是自然科学的根本，也是工程技术的基础”。他还说：“基础研究、应用研究、开发研究和生产四个方面要紧密结合在一起，必需有一条红线，这条红线就是科学实验。”

丁肇中教授在荣获诺贝尔物理奖时特意用中文发表了一封信。他写道[②]：

“中国有一句古话：‘劳心者治人，劳力者治于人。’这种落后的思想，对发展国家中的青年们有很大的害处。由于这种思想，很多在发展国家的学生们都倾向于理论的研究，而避免实验工作……事实上，自然科学理论不能离开实验的基础，特别是，物理学是从实验产生的……我希望由于我这次得奖，能够唤起在发展国家的学生们的兴趣，而注意实验工作的重要性”。

丁肇中是因 1973 年用高能同步加速器发现 J/ψ 粒子而获诺贝尔物理奖的。值得指出的是，作为一年一度最高科学奖励的诺贝尔物理奖，从 1901 年伦琴因实验发现 X 射线而获奖以来，在 90 年中一共有 140 位获奖者，其中因实验获奖的共 94 人，占 67.1%。这一数字从另一个侧面说明了实验的重要地位。

§14.2　实验室在物理学发展中的地位

科学家进行科学研究总要从事科学实验。实验必须具备一定的条件，除了仪器设备的条件外，作为科学研究的基本场所，实验室是进行实验必不可少的重要条件。随着科学实验的进步，实验室的建设成了科学发展的决定性因素之一。实验工作越来越复杂，分工越来越细，技术

[①] 郭奕玲，沙振舜等编著，《著名物理实验及其在物理学发展中的作用》山东教育出版社，1985 年

[②] 引自 Les Prix Nobel，（1976）

性、专业性越来越强，需要各种人才在统一的布署下互相配合，发挥集体力量。实验室的管理体制越来越严密。同时实验室也是培训人才的中心，是科学组织的基地，实验室的传统和经验成了宝贵的精神财富，实验室的历史也相应地成了科学史中很有意义的课题。

§14.3　实验室的早期历史

最早的物理实验往往是在私人住宅中进行的，研究者经常把自己的住房的一部分当作科学研究的场所。伽利略时代已经有比较正规的实验研究，伽利略本人也做过许多物理实验，但他没有明确提到他有自己的实验室。1592–1610 年他在意大利的珀都亚曾经在自己的家里建立了一间小作坊，甚至雇用了一名技术熟练的工人在家制作他设计的“军用几何比例规”，还制作过最早的天文望远镜。据说，伽利略在《两门新科学》（1638 年出版）中描述的许多实验就是当年在这里做的。如果真是这样，伽利略的实验室可谓最早的物理实验室了。

英国的玻意耳测量气体体积随压强变化的关系要用到一根长管子。据记载，由于管子太长，室内无法周转，只好拿到住宅的楼梯上进行实验。牛顿的白光色散实验是在他剑桥大学的住房中做的。美国的富兰克林在做了风筝实验之后，又在家里竖立了一根绝缘的铁杆准备进行空气带电试验。他们都没有利用职位之便在所在机构建立专门的实验室。

胡克也许是建立物理实验室的先驱。他当过玻意耳的助手，在玻意耳的建议下，1662 年胡克当了英国皇家学会的仪器馆长，负责设计仪器装备，每周向皇家学会的例会提供三四个有意义的实验。不过他的工作并没有得到延续，1703 年胡克去世后，皇家学会实验室也逐渐衰败。

实验室作为一个进行实验的专门场所或建筑物，并不是最先从物理学开始的。化学实验室和天文学观测站比物理实验室早得多。Laboratorium 一词在德文中原来意味着化学实验室。中世纪有炼金术和占星术的实验室，当时为了求得长生不老的药物和找到金属嬗变的秘诀，炼丹师颇为活跃。例如在巴黎卢浮宫的画廊上就有一幅名画描绘 16 世纪的一间化学实验室，其实是“炼金”实验室，这是一间豪华的地下室，地面上摆满了蒸馏器、坩埚和甑。在 18 世纪乃至 19 世纪以前，这类实验室几乎毫无例外都属于个人所有，设在私人住宅的地下室，有的甚至就设在厨房的一角。瑞典著名化学家贝采利乌斯（Berzelius）的私人实验室就设在他家的厨房里，一个人单独工作，也乐于接受学生来学习，不过每年只限于一个，他还常接纳化学家的访问，有的人甚至留了下来一起作实验研究，成了他的帮手。

为什么物理学会落后于化学呢？这是因为，化学更直接地为实际生活所需要，化学知识对冶金是必不可少的；另一方面，是因为化学实验

的花费较少，只需要一些瓶瓶罐罐，化学试剂一般比较便宜，而物理仪器则甚为昂贵。当年空气泵、温度计和望远镜都属于高级奢侈品，平常人家是买不起的。

近代化学的奠基人很重视实验室的建设。俄国的罗蒙诺索夫说服了俄国科学院在彼得堡于 1748 年建立了一所装备精良的实验室。在那里进行有关化学的冶金学的以至于光学和电学的研究，不过他的影响没有超出俄国。著名化学家拉瓦锡（Lavoisier）于 1776—1792 年在巴黎兵工厂建立的实验室装备优良，对科学界影响较大。富兰克林和瓦特都曾访问过这所实验室。1818 年盖–吕萨克也在那里建立了实验室，使后来李比希（J.Liebig，1803—1870）有机会做了许多化学实验。李比希原来在德国的波恩从事化学分析，对当时德国化学的分析技术很不满意，后得奖学金前往巴黎学习，在盖–吕萨克的实验室里收获极大，1824 年李比希到基森（Giessen）大学任教，建立了一所用于研究和教学的实验室。他的管理方法为后人树立了样板，他自己是这样描述的[①]：

“实验室中真正的教学只为初学者安排，由实验室助手负责。我的特殊学生（按：相当于现在的研究生）的进步则完全靠他们自己。我布置任务并且督促任务的执行，就象一个圆的半径有其公共的圆心一样。我不作具体指导，每天早晨从每个人那里收到一份报告，报告各自在前一天做了什么以及对所从事的工作的看法，我则加以肯定或作些评论。每个人都按自己的进程工作，通过相互联系、经常性的交换意见和参加其他人的工作，他们互相学习。冬季我每周两次对当时最重要的问题作些综述，把我自己的工作以及他们的工作再加上其他化学家的研究综合在一起作一报告”。

李比希的成功主要在于得到了公众资助，使他有可能聘请实验室职员，并且有足够的经费采购实验所需的器材物品。他的实验室规模比瑞典贝采利乌斯的私人实验室要大得多。在李比希的努力下，吉森大学的化学实验室闻名于欧洲，慕名而来的学生聚集在他周围，研究成果不断涌现。很快在杜宾根、波恩和柏林等地也按这一模式建起了类似的实验室。其实，跟李比希相似的想法在英国也有人提出过，但因得不到支持而落空。

后来英国的阿尔伯特亲王听取了李比希的建议，在 1845 年建立了皇家化学学院，并由李比希的学生霍夫曼（A.W.Hofmann）提任院长。这所学院进行过许多英国急需解决的重大化学研究课题，但因政府支持不力，工作开展不大顺利。20 年后合并到了皇家矿业学校。

英国另一所著名的实验基地叫英国皇家研究所，原来也是化学实验室，由伦福德创建于 1800 年，其宗旨是进行科学知识的普及。由于戴维

[①] 转引自 M.Phillips,Am.J.Phys.,51（1983）p.497

和法拉第的工作，这一研究所享有盛名。众所周知，在这个研究所里，法拉第以毕生精力研究了各种电化学和电磁现象，发现了电解定律、电磁感应和磁光效应。

§14.419　世纪的物理实验室

19 世纪初，法国是实验研究的中心，例如：以精密量计著称的法国工艺学院（CNAM）早在 1793 年就已成立，开始大概是作为博物馆之类的场所，1829 年建成实验室。但即使在法国，条件也是很差的，科学家仍然是在相当艰难的情况下从事实验工作。例如：著名实验生理学家贝尔纳（C.Bernard）工作在潮湿的小地窖中，他甚至管这个地方叫“科学研究者的坟墓”。盖–吕萨克的实验室也是在地下，他为了预防自己受潮，整天穿着木底鞋。当时，这些实验室都是私人所有，要购置必要的仪器设备，没有足够的钱财是不可能的。所以，只有出身于“家产万贯”的富裕人家的子弟才能进行物理实验。物理学家往往把自己的仪器设备看得非常宝贵，有的仪器被打磨得铮亮，有的精心油漆，妥善地摆放在玻璃柜中。杜隆（Dulung）几乎把自己全部财产都化费在购置仪器；菲涅耳为了做他的实验，付出了大量资财；傅科的许多实验也是在家里做的；电流磁效应发现不久，学者们聚集在安培的住宅门前，为的是一睹通过电流后使磁针偏转的细铂丝。直到 1868 年，由于德国明显地有超过法国的趋势，才使法国政府认识到应该对科学家的工作提供必要的支持。最有名的一件事是，拿破仑三世亲自下令，给上面提到的贝尔纳专门建立一间实验室。

最早的规模较大的物理实验室要算柏林大学的物理实验室了。它是由马格努斯（H.G.Magnus，1802—1870）创建的，马格努斯原来也是化学家，1845 年成为柏林大学物理和技术教授。开始他也是在自己的住宅里分出几间房屋当作实验室，让最优秀的学生参加研究工作，其中有来自欧美各国的年轻学者。据一位曾在那里工作过的美国学者里兹（A.R.Leeds）回忆，当他在那里学习时，同时还有三个别的学生在那里工作，一个研究声学，一个研究偏振光，还有一个检测刚刚发现的化合物晶体。赫姆霍兹和丁铎尔也出身于这个实验室。由于规模逐渐扩大，柏林大学给予适当的财政资助，于是这所私人实验室转变成了大学机构的一部分，1863 年正式成为柏林大学物理实验室，是当时世界上屈指可数的一所正规物理实验室。

柏林大学也因此成为欧洲物理学研究中心之一。马格努斯还创造了学术讨论会（colloquium）的形式，让学生轮流报告自己新近的科学进展，也常邀请访问学者做报告，研究生院的体制由此逐渐形成。1871 年，赫姆霍兹继任物理实验室教授，他是著名的声学和生理学教授，对能量

守恒与转化定律的形成有过贡献。在他的引导下，他的学生 H.赫兹做了著名的电磁波实验。

柏林大学物理实验室的成功经验吸引了英国同行的注意，也开始按德国的模式建立实验室。走在最前面的是著名物理学家 W·汤姆生，即开尔文勋爵。1846 年，他被任命为格拉斯哥（Glasgow）大学物理学教授。在他的讲堂附近有一座废弃了的酒窖，他就利用来布置成一个实验室，后来又增加了一间没人用过的考试室。原先在英国往往只有表演实验，现在他让学生自己动手做。他邀请学生动手做实验的理由是：“有些观测工作量太重，没有两三个人一起干往往做不成”。到 1866 年，这所实验室才正式被大学承认。尽管开尔文当时已有很高的声望，也没有能够建立象柏林大学物理实验室那样的物理实验室。这也许跟开尔文的个性有关，因为他最感兴趣的还是工程方面的研究，例如：横渡大西洋的电缆工程，而对基础研究不够重视。不过他的学生对实验工作还是非常积极的，因为他常常把有关工程的课题交给学生做，学生们的实验工作大多是创造性研究。有趣的是，他的学生多半是学过哲学而又进入神学班的高年级生。开尔文在 1885 年回忆说[①]：

“我记得有一位德国教授知道这种做法和人员使用情况后表示非常惊讶，问道：‘神学家还学物理？’我就回答：‘是的，他们都这样做，而且他们中的许多人做的是第一流的实验’。”

英国当时还有几所大学建立了物理实验室，例如伦敦的大学学院和国王学院都设立了学生用的物理实验室，但未纳入正规的物理课程，也没有规定学生必须参加研究。待到 19 世纪后期，牛津大学建立了克拉伦敦（Clarendon）实验室，剑桥大学建立了卡文迪什实验室。这两所实验室在世界上都很有名，其中尤以卡文迪什实验室的影响最大。

§14.5　物理实验室的典范——卡文迪什实验室

在现代物理学的发展中，实验室的建设更具有重要意义。卡文迪什实验室作为 20 世纪物理学的发源地之一，它的经验具有特殊的意义。

卡文迪什实验室相当于英国剑桥大学的物理系。剑桥大学建于 1209 年，历史悠久，与牛津大学遥相对应。卡文迪什实验室创建于 1871 年，1874 年建成，是当时剑桥大学校长 W.卡文迪什（William Cavendish）私人捐款兴建的（他是 H.卡文迪什的近亲），这个实验室就取名为卡文迪什实验室。当时用了捐款 8450 英镑，除盖成一座实验室楼馆外，还采购了一些仪器设备。

英国是 19 世纪最发达的资本主义国家之一。把物理实验室从科学家

[①] W.Thomson,Nature,31（1895）p.411

私人住宅中扩展为研究单位，适应了 19 世纪后半叶工业技术对科学发展的要求，促进了科学技术的开展。随着科学技术的发展，科学研究工作的规模越来越大，社会化和专业化是必然趋势。剑桥大学校长的这一做法是有远见的。

当时委任著名物理学家麦克斯韦负责筹建这所实验室。1874 年建成后他当了第一任实验室主任，直到他 1879 年因病去世。在他的主持下，卡文迪什实验室开展了教学和科学研究，工作初具规模。按照麦克斯韦的主张，物理教学在系统讲授的同时，还辅以表演实验，并要求学生自己动手。表演实验要求结构简单，学生易于掌握。麦克斯韦说过：“这些实验的教育价值，往往与仪器的复杂性成反比，学生用自制仪器，虽然经常出毛病，但他们却会比用仔细调整好的仪器，学到更多的东西。仔细调整好的仪器学生易于依赖，而不敢拆成零件。”从那时起，使用自制仪器就形成了卡文迪什实验室的传统。实验室附有工间，可以制作很精密的仪器。麦克斯韦很重视科学方法的训练，也很注意前人的经验。例如：他在整理一百年前 H.卡文迪什留下的有关电学的论著之后，亲自重复并改进卡文迪什做过的一些实验。同时，卡文迪什实验室还进行了多种实验研究，例如：地磁、电磁波的传播速度、电学常数的精密测量、欧姆定律、光谱、双轴晶体等等，这些工作为后来的发展奠定了基础。

麦克斯韦去世后，瑞利（即 J.W.斯特拉特）继任卡文迪什实验室主任。瑞利在声学和电学方面很有造诣。在他的主持下，卡文迪什实验室系统地开设了学生实验。1884 年，瑞利因被选为皇家学院教授而辞职，由 28 岁的 J.J.汤姆生继任。

J.J.汤姆生对卡文迪什实验室的建设有卓越贡献。在他的建议下，从 1895 年开始，卡文迪什实验室实行吸收外校及国外的大学毕业生当研究生的制度，一批批优秀的年轻学者陆续来到这里，在 J.J.汤姆生的指导下进行学习和研究。卡文迪什实验室建立了一整套培养研究生的管理体制，树立了良好的学风。他培养的研究生中，有许多后来成了著名科学家，例如卢瑟福、朗之万、W.L.布拉格、C.T.R.威尔逊、里查森、巴克拉等人，其中多人获得了诺贝尔奖，对科学的发展有重大贡献，有的成了各研究机构的学术带头人。

J.J.汤姆生领导的 35 年中间，卡文迪什实验室的研究工作取得了如下成果：

进行了气体导电的研究，从而导致了电子的发现；放射性的研究，导致了α、β射线的发现；进行了正射线的研究，发明了质谱仪，从而导致了同位素的研究；膨胀云室的发明，为核物理和基本粒子的研究准备了条件；电磁波和热电子的研究导致了真空管的发明和改善，促进了无线电电子学的发展和应用。这些引人注目的成就使卡文迪什实验室成了物理学的圣地，世界各地的物理学家纷纷来访，把这里的经验带回去，

对各地实验室的建设起了很好的指导作用。

1919 年 J.J.汤姆生的职位由卢瑟福继任。卢瑟福更重视对年轻人的培养。在他的带领下，查德威克发现了中子；考克拉夫特和沃尔顿发明了静电加速器；布拉开特观测到核反应；奥里法特发现氚；卡皮查在高电压技术、强磁场和低温等方面取得硕果。

1937 年卢瑟福去世，由 W.L.布拉格继任卡文迪什实验室教授。在他的领导下，卡文迪什实验室的主攻方向由核物理改为晶体物理学、生物物理学和天体物理学，在新的形势下实现了战略转折。以后是固体物理学家莫特和皮帕德（A.B.Pippard）主持。70 年代以后，古老的卡文迪什实验室大大扩建，仍不失为世界著名实验室之一。

§14.6　二十世纪世界著名实验室简介

进入二十世纪，各类物理实验室如雨后春笋，研究工作广泛开展。可以说，实验室是科学的摇篮，是科学研究的基地。下面选取若干有代表性的，对科学发展起过或正在起重要作用的物理实验室，分别作些介绍。

第一类是建立在大学里面，附属于大学的实验室。除了英国剑桥大学的卡文迪什实验室以外，还可以举出许多，其中著名的有莫斯科大学的物理实验室，荷兰莱顿大学的低温实验室，美国哈佛大学的杰佛逊（Jefferson）物理实验室，加州伯克利分校的劳伦斯辐射实验室，英国曼彻斯特大学的物理实验室。它们大都以基础研究为主，各有特长。例如：

一、荷兰的莱顿低温实验室

二十世纪初，这个实验室在昂纳斯（K.Onnes）领导下，在低温领域独占鳌头，最先实现了氦的液化，发现了超导电性，并一直在低温和超导领域居领先地位。特别是它以大规模工业技术发展实验室，开创了大科学的新纪元。荷兰是一个工业小国，荷兰莱顿低温实验室的经验特别值得我们学习和借鉴。

二、美国加州大学伯克利分校的劳伦斯辐射实验室它是电子直线加速器的发源地，创建于 30 年代，当时正值经济萧条时期，创建人劳伦斯以其特有的组织才能，充分发掘美国的人力、物力和财力，建起了第一批加速器。在他的领导组织下，实验室成员开展了广泛的科学研究，发现了一系列超重元素，开辟了放射性同位素、重离子科学等研究方向。它是美国一系列著名实验室：Livermore，Los Alamos，Brookhaven 等实验室的先驱，也是世界上成百所加速器实验室的楷模。

第二类实验室属于国家机构，有的甚至是国际机构，由好几个国家联合承办。它们大多从事于基本计量，高精尖项目，超大型的研究课题，

和国防军事任务。例如：

三、德国的帝国技术物理研究所（简称 PTR）

帝国技术物理研究所建于 1884 年，相当于德国的国家计量局，以精密测量热辐射著称。十九世纪末该研究所的研究人员致力于黑体辐射的研究，导致了普朗克发现作用量子。可以说这个实验室是量子论的发源地。

四、英国国家物理实验室（简称 NPL）

英国的国家物理实验室，是英国历史悠久的计量基准研究中心，创建于 1900 年。

1981 年分 6 个部：即电气科学、材料应用、力学与光学计量、数值分析与计算机科学、量子计量、辐射科学与声学。

作为高度工业化国家的计量中心，与全国工业、政府各部门、商业机构有着广泛的日常联系，对外则作为国家代表机构，与各国际组织、各国计量中心联系。它还对环境保护，例如噪声、电磁辐射、大气污染等方面向政府提供建议。英国国家物理实验室共有科技人员约 1000 人，1969 年最高达 1800 人。

五、欧洲核子研究中心（简称 CERN）

欧洲核子研究中心创立于 1954 年，是规模最大的一个国际性的实验组织。它的创建、方针、组织、选题、经费和研究计划的执行，都很有特点。1983 年在这里发现 $W^{\pm}$和 Z^{0}粒子，次年该中心两位物理学家鲁比亚和范德梅尔获诺贝尔物理奖。

欧洲核子研究中心是在联合国教科文组织的倡导下，由欧洲 11 个国家从 1951 年开始筹划，现已有 13 个成员国。经费由各成员国分摊，所长由理事会任命，任期 5 年。下设管理委员会、研究委员会和实验委员会，组织精干，管理完善。人员共达 6000 人，多为招聘制。三十余年来，先后建成质子同步回旋加速器、质子同步加速器、交叉储存环（ISR）、超质子同步加速器（SPS）、大型正负电子对撞机（LEP）、并拥有世界上最大的氢气泡室（BEBL）。

欧洲核子研究中心作为国际性实验机构，拥有雄厚的财力、物力和技术力量。由于工作涉及许多国家和组织，在建设和研究中难免会出现种种矛盾和磨擦，但经过协商和合作，工作进行顺利，庞大计划都能按时兑现，接连不断取得举世瞩目的成就（参见：高能物理，1985 年第 3 期，第 26 页）。

第三类实验室直接归属于工业企业部门，为工业技术的开发与研究服务。其中最著名的有贝尔实验室和 IBM 研究实验室。

六、贝尔实验室

贝尔实验室原名贝尔电话实验室，成立于 1925 年，是一所最有影响的由工业企业经营的研究实验室。主要宗旨是进行通讯科学的研究，有

研究人员 20000 人，下属 6 个研究部，共 14 个分部，56 个实验室，每年经费达 22 亿美元，其中 10%用于基础研究。除了无线电电子学以外，在固体物理学（其中包括磁学、半导体、表面物理学）、天体物理学、量子物理学和核物理学等方面都有很高水平。在这个研究机构中拥有一大批高水平的科研人员，几十年来获得诺贝尔物理奖的先后有：发明电子衍射的戴维森，发明晶体管的肖克利、巴丁和布拉坦，发明激光器的汤斯和肖洛，理论物理学家安德逊，射电天文学家彭齐亚斯和威尔逊。

贝尔实验室的经验很值得注意。工业企业对科学研究，特别是对基础研究的重视；开发和研究二位一体；领导有远见有魄力，善于抓住有生命力的新课题，这些都是有益的经验。

七、IBM 研究实验室

IBM 是 International Bisiness Machines Corporation（美国国际商用机器公司）的简称，现已发展成为跨国公司，在计算机生产与革新中居世界领先地位。它创建于 1911 年，原名 Computing—Tabulating—Recording Co.（C.T.R.），是由三家生产统计机械、时间记录器的公司组成。这些公司分别创建于 1889、1890、1891 年。1984 年底，IBM 公司的雇员超过 39000 人，业务遍及 130 个国家。IBM 研究实验室也叫 IBM 研究部，共有研究人员 3500 人，（还吸收许多博士后和访问学者参加工作），专门从事基础科学研究，并探索与产品有关的技术，其特点是将这两者结合在一起。科学家在这里工作，一方面推进基础科学，一方面提出对实际应用有益的科学新思想。研究部下属四个研究中心：

(1)在美国纽约的 Thomas J.Watson 研究中心。从事计算机科学、输入/输出技术、生产性研究数学、物理学、记忆和逻辑等方面的研究。其中物理学包括：凝聚态物理、超微结构、材料科学、显微技术、表面物理、激光物理以至天文学和基本粒子。

(2)在美国加州的 Almaden 研究中心。除了计算机科学以外，还进行高温超导、等离子体、扫描隧道显微镜和同步辐射等研究。

(3)瑞士 Zurich 研究中心。重点是激光科学与技术，特别是半导体激光器、光学储存、光电材料、分子束外延、高温超导、超显微技术等方面，还进行信息处理等计算机科学研究。

(4)日本东京研究中心。内分计算机科学研究所、新技术研究所和东京科学中心，主要是结合计算机的生产和革新进行研究。

进入 80 年代，IBM 研究中心成绩斐然，两届诺贝尔物理奖都被它的成员夺得：一是因发明扫描隧道显微镜，宾尼格（G.K.Ginnig）与罗勒尔（H.Rohrer）共获 1986 年诺贝尔物理奖的一半，二是因发现金属氧化物的高温超导电性，柏诺兹（J.G.Bednorz）和缪勒（K.A.Müller）共获 1987 年奖。

第十五章　单位、单位制与基本常数简史

科学技术的发展，特别是物理学的发展，跟人类的观测能力密切相关。观测得越精确，就越能细致地描述自然现象，越有可能从理论上解释各种自然现象，并且更有效地控制自然。观测精确度的提高和计量制度的完善是科学文化进步的重要标志，也是物理学发展的必要条件。在科学技术的发展史里很自然地交织着计量科学的发展史。计量科学发展史包含很多内容，这里仅就单位和单位制的沿革以及基本物理常数的测定史作些简介。

§15.1　基本单位的历史沿革

15.1.1　长度单位

古代常以人体的一部分作为长度的单位。例如我国三国时期（公元三世纪初）王肃编的《孔子家语》一书中记载有：“布指知寸，布手知尺，舒肘知寻。”两臂伸开长八尺，就是一寻。还有记载说：“十尺为丈，人长八尺，故曰丈夫。”可见，古时量物，寸与指、尺与手、寻与身有一一对应的关系。

西方古代经常使用的长度单位中有所谓的“腕尺”，约合 52～53 厘米，与从手的中指尖到肘之间的长度有密切关系。

也有用实物作为长度单位依据的。例如，英制中的英寸来源于三粒圆而干的大麦粒一个接一个排成的长度。

多少年来世界各国通行种类繁多的长度单位，甚至一个国家或地区在不同时期采用不同的长度单位，杂乱无章，极不统一，对商品的流通造成许多麻烦。所以，随着科学技术的进步，长度单位逐渐趋于统一，这个进程早在几百年前就已经开始了。

1790 年法国国民议会通过决议，责成法国科学院研究如何建立长度和质量等基本物理量的基准，为统一计量单位打好基础。次年，又决定采用通过巴黎的地球子午线的四分之一的千万分之一为长度单位，选取古希腊文中“metron”一词作为这个单位的名称，后来演变为“meter”，中文译成“米突”或“米”。从 1792 年开始，法国天文学家用了 7 年时间，测量通过巴黎的地球子午线，并根据测量结果制成了米的铂质原器，这支米原器一直保存在巴黎档案局里。

法国人开创米制后，由于这一体制比较科学，使用方便，欧洲大陆各国相继采用。

后来又作了测量，发现这一米原器并不正好等于地球子午线的四千万分之一，而是大了 0.2 毫米。人们认为，以后测量技术还会不断进步，

势必会再发现偏差，与其修改米原器的长度，不如就以这根铂质米原器为基准，从而统一所有的长度计量。

■图 15–1 国际米原器

1875 年 5 月 20 日由法国政府出面,召开了 20 个国家政府代表会议，正式签置了米制公约，公认米制为国际通用的计量单位。同时决定成立国际计量委员会和国际计量局。到 1985 年 10 月止，米制公约成员国已有 47 个。我国于 1977 年参加。

国际计量局经过几年的研究，用含铂 90%、铱 10%的合金精心设计和制成了 30 根横截面呈 X 形的米原器，如图 15–1。这种形状最坚固又最省料，铂铱合金的特点则是膨胀系数极小。这 30 根米原器分别跟铂质米原器比对，经过遴选，取其中的一根作为国际米原器。1889 年，国际计量委员会批准了这项工作，并且宣布：1 米的长度等于这根截面为 X 形的铂铱合金尺两端刻线记号间在冰融点温度时的距离。

其余一些米原器都与国际米原器作过比对，后来大多分发给会员国，成为各国的国家基准，以后每隔几十年都要进行周期检定，以确保长度基准的一致性。

然而实际上米原器给出的长度并不一定正好是 1 米，由于刻线工艺和测量方法等方面的原因，在复现量值时总难免有一定误差，这个误差不小于 0.1 微米，也就是说，相对误差可达 1×10^{-7}。时间长了，很难保证米原器本身不会发生变化，再加上米原器随时都有被破坏的危险。所以，随着科学与技术的发展，人们越来越希望把长度的基准建立在更科学、更方便和更可靠的基础上，而不是以某一个实物的尺寸为基准。光谱学的研究表明，可见光的波长是一些很精确又很稳定的长度，有可能当作长度的基准。19 世纪末，在实验中找到了自然镉（Cd）的红色谱线，具有非常好的清晰度和复现性，在 15℃的干燥空气中，其波长等于 $\lambda_{Cd}=6438.4696\times10^{-10}$ 米。

1927 年国际协议，决定用这条谱线作为光谱学的长度标准，并确定：

$$1\text{ 米}=155\ 316\ 4.13\lambda_{Cd}$$

人们第一次找到了可用来定义米的非实物标准。科学家继续研究，后来又发现氪（^{86}Kr）的橙色谱线比镉红线还要优越。1960 年，在第十一届国际计量大会上，决定用氪（^{86}Kr）橙线代替镉红线，并决定把米的定义改为：“米的长度等于相当于氪（^{86}Kr）原子的 $2p_{10}$ 到 $5d_5$ 能级之间跃迁的辐射在真空中波长的 165 076 3.73 倍。”

这个基准的精确度相当高，相对误差不超过 4×10^{-9}，相当于在 1 千米长度测量中不差 4 毫米。

但是原子光谱的波长太短，又难免受电流、温度等因素的影响，复现的精确度仍受限制。

60 年代以后，由于激光的出现，人们又找到了一种更为优越的光源，

用激光代替氪谱线，可以使长度测量得更为准确。只要确定某一时间间隔，就可从光速与这一时间间隔的乘积定义长度的单位。80 年代，用激光测真空中的光速 c，得 c=299 792 458 米/秒。

1983 年 10 月第十七届国际计量大会通过了米的新定义："米是光在真空中 1/299 792 458 秒的时间间隔内所经路程的长度"。

新的米定义有重大科学意义。从此光速 c 成了一个精确数值。把长度单位统一到时间上，就可以利用高度精确的时间计量，大大提高长度计量的精确度。

15.1.2 质量单位

古代质量单位和长度单位的情况相似，也有多种多样的形式。例如：在波斯用卡拉萨（karasha）作质量的单位，约合 0.834 千克，埃及用格德特（gedet），约合 9.33 克。

我国秦代度量衡制度中规定：1 石=4 钧，1 钧=30 斤，1 斤=16 两。与现代国际单位制比较，1 斤约合 0.256 千克。

英制中以磅（pound），盎司（ounce），打兰（dram），格令（grain）作单位：1 磅=16 盎司=256 打兰=7000 格令

不列颠帝国曾用纯铂制成磅原器，它是高约 1.35 英寸，直径 1.15 英寸的纯铂圆柱体。

最初的千克质量单位是由18世纪末法国采用的长度单位米推导出来的。1 立方分米纯水在最大密度（温度约为 4°C）时的质量，就定为 1 千克。

1799 年法国在制作铂质米原器的同时，也制成了铂质千克基准，保存在巴黎档案局里。

后来发现这个基准并不准确地等于 1 立方分米最大密度纯水的质量，而是等于 1.000 028 立方分米。于是在 1875 年米制公约会议之后，也用含铂 90%、铱 10%的合金制成千克原器，一共做了三个，经与巴黎档案局保存的铂质千克原器比对，选定其中之一作为国际千克原器。这个国际千克原器被国际计量局的专家们非常仔细地保存在特殊的地点，用三层玻璃罩罩好，最外一层玻璃罩里抽成半真空，以防空气和杂质进入。随后又复制了四十个铂铱合金圆柱体，经过与国际千克原器比对后，分发给各会员国作为国家基准。跟米原器一样，千克原器也要进行周期性的检定，以确保质量基准的稳定可靠。

15.1.3 时间单位

在人类观察到的自然现象中，以天空中发生的现象为最明显，也最有规律，所以很自然地时间的量度以地球自转的周期作为基准，这就是所谓的太阳日。1 秒=1/86400 平太阳日。但是由于地球自转并不均匀也不稳定，1960 年国际计量大会确认，把时间基准改为以地球围绕太阳公转为依据，即：把秒定义为在 1900 年地球绕太阳沿轨道运行一周所需时

间的 1/315 569 25.9747。这一数据之所以有如此之高的精确度，是因为这个结果是通过为期数年的一系列天文观测获得的。

然而根据这个定义很难对秒本身进行直接比较。正好在这期间，时间和频率的测量技术有了很大发展，1967 年第十三届国际计量大会重新规定了时间单位的定义：

“秒是铯–133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间”。

15.1.4 温标

现在通用的国际单位制中温度以开尔文（K）表示，这个温度单位也是基本单位。严格说来，温度单位的选择实际上是一个温标问题。热学发展史中出现过华氏温标、列氏温标、兰氏温标、摄氏温标、气体温标和热力学温标等。热力学温标是 1848 年开尔文首先提出的，（参看§2.4），由热力学温标定义的热力学温度具有最严格的科学意义。其余几种都属于经验温标，其共同特点是人为选择某一特定的温度计和若干温度固定点来定义温标，因此缺乏客观标准。这些经验温标已成为历史，但跟现代的温标仍有一些渊源关系。

华氏温标是德国人华伦海特（D.G.Fahrenheit）大约在 1710 年提出的，规定水的冰点为 32 度，水的沸点为 212 度。华氏温度至今还在英、美等国民间流行。

列氏温标由列奥缪尔（R.A.F.Reaumur）于 1730 年提出，规定水的冰点为零度，水的沸点为 80 度。列氏温标在德国曾一度流行。

兰氏温标由英国人兰金（Rankine）提出，其定义为

$$t_R=t_F+459.67$$

实际上兰氏温度是以绝对零度为计算起点的华氏温度，以 ^0R 表示之。现在科技界已很少采用。

摄氏温标是瑞典天文学家摄尔萨斯（A.Celsius）在 1742 年提出的。他原来的方案是以水的沸点为零度，水的冰点为 100 度。次年法国人克里斯丁（Christian）把两个标度倒过来，就成了现在通用的标度。

以气体温度计标定温度所构成的气体温标最接近热力学温标。由于气体温度计的复现性较差，国际间又协议定出国际实用温标，以统一国际间的温度量值，国际实用温标几经变革，为的是由此定出的温度尽可能接近热力学温度。

早在 1887 年，国际计量委员会就曾决定采用定容氢气体温度计作为国际实用温标的基础。

1927 年第七届国际计量大会决议采用铂电阻温度计等作为温标的内插仪器，并规定在氧的凝固点（–182.97°C）到金凝固点（1063°C）之间确定一系列可重复的温度或固定点。

1948 年第十一届国际计量大会对国际实用温标作了若干重要修订。

例如，以金融点代替金凝固点；以普朗克黑体辐射定律代替维恩定律；引用更精确的常数值；计算公式更为精确；光测高温计的测量限值扩大等等。

1960 年又增加了一条重要修订，即把水的三相点作为唯一的定义点，规定其绝对温度值为 273.16（精确），以代替原来水冰点温度为 0.00℃（精确）之规定。而水的冰点根据实测，应为 273.1500±0.0001K。采用水的三相点作为唯一的定义点是温度计量的一大进步，因为这可以避免世界各地因冰点变动而出现温度计量的差异。

1968 年对国际实用温标又作了一次修订，代号为 IPTS–68。其特点是采用了有关热力学的最新成就，使国际实用温标更接近热力学温标。这一次还规定以符号 K 表示绝对温度，取消原来的符号（K），并规定摄氏温度与热力学温标的绝对温度单位精确相等，摄氏温度 t=绝对温度 T–273.15（精确）。

1975 年和 1976 年分别对 IPTS–68 作了修订和补充，把温度范围的下限由 13.81K 扩大到 0.5K。但还是出现不足之处，主要是在实验中不断发现 IPTS–68 在某些温区与国际单位制定义的热力学温度偏差甚大。

1988 年国际度量衡委员会推荐,第十八届国际计量大会及第 77 届国际计量委员会作出决议，从 1990 年 1 月 1 日起开始在全世界范围内采用重新修订的国际温标，这一次取名为 1990 年国际温标，代号为 ITS–90，取消了“实用”二字，因为随着科学技术水平的提高，这一温标已经相当接近于热力学温标。和 IPTS–68 相比较，100℃时偏低 0.026℃，即标准状态下水的沸点已不再是 100℃，而是 99.974℃。图 15–2 是 ITS–90 与 IPTS–68 之间的差异曲线。

■图 15–2ITS–90 与 IPTS–68 之间的差异曲线

显然，ITS－90 的实施会给精密温度计量带来好处，是科学技术发展的又一标志。

§15.2 单位制的沿革

物理量之间通过各种物理定律和有关的定义彼此建立联系。人们往往取其中的一些作为基本物理量，以它们的单位作为基本单位，形成配套的单位体系，其他的单位可以由此推出，这就是单位制。

由于历史的原因，世界各国一直通行有各种不同的单位体制，混乱复杂。不同行业采用的单位也不尽相同，例如：法国曾通用米–吨–秒制，英美曾通用英尺–磅–秒制，技术领域中采用工程单位制，即米–千克力–秒制，而物理学则习惯于厘米–克–秒（CGS）单位制。这对经济交往和科技工作都十分不利。为了便于国际间进行工业技术的交流，1875 年在签置米制公约时，规定以米为长度单位，以千克为质量单位，以秒为时间

单位。这就是众所周知的米–千克–秒（MKS）单位制。

15.2.1　几种电磁单位制

电磁学中单位和单位制更为混乱，几经变革，走过了一条曲折的道路。

早在 1832 年，高斯在他的著名论文《换算成绝对单位的地磁强度》一文中就强调指出：必须用根据力学中的力的单位进行的绝对测量来代替用磁针进行的地磁测量。他为此提出了一种以毫米、毫克和秒为基本单位的绝对电磁单位制。高斯的主张得到了 W.韦伯的支持，韦伯把高斯的工作推广到其它电学量。然而遗憾的是，电磁量实际上可以由两个互不相容的方程系来描述，因为两个库仑定律都可以当作定义性方程：一个是静电学的库仑定律，一个是静磁学的库仑定律。于是出现了两种“绝对”电磁学单位。19 世纪 50 年代初，英国的 W.汤姆生（开尔文）也做了类似的工作。他根据英国力学单位进行了与电信有关的一些电测量。1861 年，英国的布赖特（C.Bright）和克拉克（L.Clark）发表《论电量和电阻标准的形成》一文，倡议建立一种统一的实用单位。他们的倡议得到了 W.汤姆生的支持。于是这一年英国科学促进会成立了以 W.汤姆生为首的六人电标准委员会，其宗旨是统一电阻和电容的标准，建立恰当的实用单位，并确定绝对单位和实用单位的换算关系。这个委员会主张用厘米–克–秒作为基本单位，于是又形成了两种单位制：厘米–克–秒静电单位制（CGSE 或 esu）和厘米–克–秒电磁单位制（CGSM 或 emu）。

麦克斯韦也是这个委员会的成员。他对单位的规范和统一非常关心，亲自作了许多实验，提出了不少有益的建议。例如，他在 1865 年写道：

“至今采用的命名方法缺点很多。在涉及各个测量时，我们必须说明哪个数是表示静电单位的值还是电磁绝对单位的值。如果运用到乘法，乘得的结果也必须加以命名，而且还必须牵涉到长度、质量和时间的单位标准，因为有些作者用磅而有些用克，有些用米而有些用毫米作基本单位。这样繁琐的命名和由此带来错误的危险应该避免”。

在六人电标准委员会的倡议下，英国科学促进会决定采用如下一些实用单位：电阻用欧姆，1 欧姆=10^9 厘米–克–秒电磁单位制的电阻单位；电势用伏特，1 伏特=10^8 厘米–克–秒电磁单位制的电势单位。1881 年巴黎第一届国际电学家大会批准了这一方案，并决定再增加电流的实用单位：安培，规定 1 伏特电势差加在 1 欧姆电阻上产生的电流强度为 1 安培，它等于 1/10 厘米–克–秒电磁单位制的电流单位。与此同时，还引入了电量的实用单位——库仑和电容的实用单位——法拉。这些单位沿用至今。

这样就形成了电磁量中的第三套单位制，即实用单位制。本来这套实用单位是附属于厘米–克–秒电磁单位制的，取的仍是“绝对”定义。

然而，为了检验的方便，有人主张再为这些实用单位选定一些实物基准。于是在1893年在芝加哥召开的第四届国际电学家大会上为这些实用单位另行规定了实物基准，并且把这些实用单位分别冠以“国际”词头。下面引一段当时的决议：

“决议，本届国际电学家大会代表各自政府的委托，正式采用以下单位作为电学计量的法定单位：

“欧姆——以国际欧姆作为电阻单位，它以等于 10^9CGS 电磁单位电阻的欧姆作为基础，用恒定电流在融冰温度时通过质量为 14.4521 克，长度为 106.3 厘米，横截面恒定的水银柱所受到的电阻来代表。”

“安培——以国际安培作为电流单位，它等于 CGS 电磁单位的 1/10，在实用上取通过硝酸银水溶液在规定条件下以每秒 0.001118 克的速率使银沉淀的恒定电流来代表已足够精确”。

同时大会还对国际伏特、国际库仑、国际法拉都作了相应的规定。

这样就出现了历史上第一套“国际”单位，这套单位不甚完备，因此提出之初，没有得到普遍承认。

电磁学单位制的变迁经历了一个相当曲折的过程。除了 CGSM 单位制，CGSE 单位制和实用单位制以外，还有高斯单位制。高斯单位制在物理学中运用广泛，至今还常见于文献。

15.2.2　乔治 MKS 制和有理化 MKS 制

早在 1901 年，意大利人乔治（G.George）就曾提出，如果在长度、质量和时间这三个基本单位之外，再增加一个电学量作为基本单位，就可以建立一种包括力学和整个电磁现象在内的一贯单位制。他当时建议用米、千克、秒和欧姆，之所以想选取欧姆，是因为电阻可以用性能特别稳定的材料来代表。

经过各国际组织长期讨论，国际计量委员会在 1935 年接受了乔治的建议，但是否定了他把电阻作为第四个基本量的意见，代之以下列更科学、更合理的方案：

(1)写成有理化形式的方程中的真空磁导率，定义为 $4\pi\times10^{-7}$ 牛顿/安培$^{-7}$。此处牛顿是被引入作为力的米–千克–秒单位制中的新单位。

(2)根据两平行载流导线之间的力规定安培。

由于第二次世界大战的干扰，这一套有理化 MKS 制直到 1948 年才开始正式采用。

基本单位中除了三个力学量外，再增加一个电磁量，这一措施有重大意义。十九世纪许多科学家主张用力学量单位作为基本单位，反映了他们的机械论观点。当时人们总认为，一切自然现象（包括电磁现象）最终都应归属于机械运动。但是，科学的发展打破了传统观念。基本单位的扩大，反映了观念的更新。1882–3 年，英国的赫维赛(O.Heaviside)首先提出有理化问题，他发现电磁学公式中 4π 的分布不尽合理。1891

年裴雷（J.Perry）建议，如果取真空磁导率$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$，就可以使电磁学公式得到更简洁的表达式，这就是 1935 年国际计量委员会作出上述决定的又一历史背景。

在电磁学单位制中磁学量的单位特别复杂，很容易混淆，这主要是因为磁学本身经历了一个概念含混的时期。最早的库仑定律是建立在磁荷概念之上的，但是实际上正负磁荷并不能象正负电荷那样单独存在。

1900 年，国际电学家大会赞同美国电气工程师协会（AIEE）的提案，决定 CGSM 制磁场强度的单位名称为高斯，这实际上是一场误会。AIEE 原来的提案是把高斯作为磁通密度 B 的单位，由于翻译成法文时误译为磁场强度，造成了混淆。当时的 CGSM 制和高斯单位制中真空磁导率μ_0是无量纲的纯数 1，所以，真空中的 B 和 H 没有什么区别，致使一度 B 和 H 都用同一个单位——高斯。

但是，磁场强度 H 和磁通密度 B 在本质上毕竟是两个不同的概念。1900 年后，就在科技界中展开了一场关于 B 和 H 性质是否相同的讨论，同时也讨论到电位移 D 和电场强度 E 的区别问题。

直至 1930 年 7 月，国际电工委员会才在广泛讨论的基础上作出决定：真空磁导率μ_0有量纲，B 和 H 性质不同，B 和 D 对应，H 和 E 对应，在 CGSM 单位制中以高斯作为 B 的单位，以奥斯特作为 H 的单位。

15.2.3 国际单位制

第二次世界大战后，出现了进一步加强国际合作的趋势，迫切要求改进计量单位和单位制的统一。在这以前，多种单位制并存的局面使各国科技人员伤透了脑筋，贻误了许多工作。

1948 年第九届国际计量大会要求国际计量委员会在科学技术领域中开展国际征询，并对上述情况进行研究。在这个基础上，1954 年第十届国际计量大会决定将实用单位制扩大为六个基本单位，即米、千克、秒、安培、开尔文和坎德拉，其中开尔文是绝对温度的单位，坎德拉是发光强度的单位。

1960 年第十一届国际计量大会决定将上述六个基本单位为基础的单位制命名为国际单位制，并以 SI（法文 Le System Inter-national el ’Unites 的缩写）表示。

1971 年第十四届国际计量大会增补了一个基本量和单位,这就是‘物质的量”及其单位——摩尔，定义它为：摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与 0.012 千克碳-12 的原子数相等。

同时 SI 单位制中还规定了一系列配套的导出单位和通用的词冠，形成了一套严密、完整、科学的单位制。

SI 单位制的提出和完善是国际科技合作的一项重要成果，也是物理学发展的又一标志。

国际单位制比起其他单位制来有许多优点：一是通用性，适用于任

何一个科学技术部门，也适用于商品流通领域和社会日常生活；二是科学性和简明性，构成原则科学明了，采用十进制，换算简便；三是准确性，单位都有严格的定义和精确的基准。

§15.3　基本物理常数的测定与评定

随着科学与技术的进步，科学成果的交流日益频繁，国际合作广泛开展，大量信息在科学技术领域中传播，这就要求人们对测量数据有共同认识，建立大家公认的基准，否则就会产生不应该的误解，或引起不必要的麻烦。

为了做到对测量数据有共同的认识，除了有必要确定国际公认的单位和单位制之外，还有一必不可少的环节，就是一些重要的物理常数，必须是科学界普遍接受的那些数值。

物理常数大致可以分为两类，一类与物性有关，例如：沸点、比热、导热系数、电阻率、电阻温度系数、折射率等等。这些常数表征物质的固有特性，可以称之为物质常数。

另有一类常数与具体的物质特性无关，是普适的，例如真空中的光速、基本电荷量、普朗克常数、精细结构常数等等，人们称之为基本物理常数。这些常数出现在物理学的各个分支里，通过物理学一系列定律和理论彼此相互联系，构成了物理学框架中不可缺少的一些关节点。

基本物理常数大多与原子物理学和粒子物理学有关，其数目不下四五十个。随着物理学的领域向纵深发展，基本物理常数涉及的范围越来越广，数目越来越多，测量方法日新月异，结果也越来越精确。一个基本常数往往可以用几种不同的方法测定或经不同的途径得出，于是就要互相比较、检验、评定并定期地在评定的基础上作出选择，把最佳的结果推荐给科学技术界的广大公众，使基本常数成为科技人员普遍利用的数据资料。

基本物理常数的精确测定是实验工作者长期奋斗的结果，是当代科学技术水平的集中反映。这项工作的意义在前一章已作说明，毋庸赘述。下面仅就基本物理常数的评定工作作些介绍，并列举几项重要的基本物理常数及其历史发展概况。

15.3.1　基本物理常数的评定

既然基本物理常数可以从不同途径得出，或者可以经各种定律和理论相互联系，就会发生是否协调的问题，如果不协调，必然引起严重后果。因此早在本世纪之初，科学界就有人致力于总结出一套协调的基本物理常数供公众采用。

1926年瓦希本（E.W.Washburn）主编的《国际评定表》第一卷（International CriticalTables，vol.1）问世，书中收集了大量物理

常数和化学常数，把一套经过认真审核的基本常数列成一览表提供给使用者，深受科技界欢迎。

1929 年伯奇（R.T.Birge）发表了著名论文：《普通物理常数的可几值》[①]，系统地对基本物理常数进行分析评定，对不同来源的数据进行对比，加以校正，用最小二乘法逐项处理基本物理常数，求其最可几值。由此向公众推荐了一套可靠的基本物理常数。论文发表后，反响强烈。

在 1937 年至 1955 年间，陆续有一些综述性论文，采用伯奇的方法对基本物理常数进行评定。1941 年和 1945 年伯奇也发表了自己这方面的工作。他们大多以个人的名义进行评定工作，力量分散，内容重复，没有统一标准。

1955 年科恩（E.R.Cohen）等人，1963 年泰勒（B.N.Taylor）等人集中了较大力量，作了系统的调查研究，先后发表了两组用最小二乘法处理过的基本物理常数。

然而，更进一步的工作有待于国际组织加强领导，国家间协同工作，才能取得更大成效。1966 年，在国际科协理事会（ICSU）领导下，成立了科学技术数据委员会（CODATA）。这个委员会的宗旨是在世界范围的基础上促进、鼓励、协调科学与技术数据的搜集分析和编撰。CODATA 下属一个基本常数工作组，专门从事与基本常数有关的工作，负责定期发表为全世界科学技术界可接受的协调的基本物理常数。

这样一来，基本物理常数的评定工作，就从学者个人的研究课题，变成了国际组织中有权威的公认代表的集体任务，同时，各国研究精密计量和基本常数的机构和专家，也在这一国际组织的指导下，按预定的目标共同攻关，既有分工，又有协作和交流，基本常数的测量和评定工作，从此走上了一个新的台阶。

下面列表表示历年来较有影响的几次基本常数评定工作。

表 15–1　历年来的基本常数评定

年代	主持人	反映科学技术中的那些重大进步
1929	伯奇	光谱学，光速测定，油滴仪
1941	伯奇	X 射线衍射法，电子技术
1947	杜蒙，科恩	微波
1955	科恩，杜蒙	核磁共振
1969	泰勒等	微波激射器，激光
1973	科恩，泰勒	约瑟夫森效应
1986	科恩，泰勒	量子霍尔效应

[①] R.T.Birge,Rev.Mod.Phys.1（1929）p.1

跟 1973 年平差相比，1986 年有如下新进展：

(1)光速已定为精确值；

(2)由于激光光谱学的发展，里德伯常数进一步精确；

(3)由于量子霍尔效应的发现，精细结构常数测得更准；

(4)由于创造了 X 射线光学干涉术，阿佛伽德罗常数突破了 ppm 大关；

(5)由于创造了单电子彭宁陷阱方法，电子 g 因子测量精确度大有提高；

(6)大多数基本常数的不确定度都降低了一个数量级，达 1PPm 以下。

下一届基本物理常数的评定，现正在着手准备。

15.3.2 几项重要的基本物理常数

下面从基本物理常数中选几个较重要的，略述其历史发展概况。

1.真空中的光速

这是最古老的物理常数之一。早在 1676 年，罗迈从木星卫的观测得出光速有限的结论。观测证实了他的预言，据此，惠更斯推算出光速约为 2×10^8 米/秒。

1728 年布拉德雷根据恒星光行差求得 $c=3.1\times10^8$ 米/秒。1849 年，斐索用旋转齿轮法求得 $c=3.153\times10^8$ 米/秒。他是第一位用实验方法测定地面光速的实验者。实验方法大致如下：光从半镀银面反射后经高速旋转的齿轮投向反射镜，再沿原路返回。如果齿轮转过一齿所需的时间正好与光往返的时间相等，就可透过半镀银面观测到光，从而根据齿轮的转速计算出光速。1862 年，傅科用旋转镜法测空气中的光速，原理和斐索的旋转齿轮法大同小异，他的结果是 $c=2.98\times10^8$ 米/秒。第三位在地面上测到光速的是考尔纽（M.A.Cornu）。1874 年他改进了斐索的旋转齿轮法，得 $c=2.9999\times10^8$ 米/秒。迈克耳孙改进了傅科的旋转镜法，多次测量光速。1879 年，得 $c=(2.99910\pm0.00050)\times10^8$ 米/秒；1882 年得 $c=(2.99853\pm0.00060)\times10^8$ 米/秒。

后来他综合旋转镜法和旋转齿轮法的特点，发展了旋转棱镜法，1924—1927 年间，得 $c=(2.99796\pm0.00004)\times10^8$ 米/秒。迈克耳孙在推算真空中的光速时应该用空气的群速折射率，可是他用的却是空气的相速折射率。这一错误在 1929 年被伯奇发觉，经改正后，1926 年的结果应为 $c=(2.99798\pm0.00004)\times10^8$ 米/秒$=299798\pm4$ 千米/秒。

后来，由于电子学的发展，用克尔盒、谐振腔、光电测距仪等方法，光速的测定比直接用光学方法又提高了一个数量级。60 年代激光器发明，运用稳频激光器可以大大降低光速测量的不确定度。1973 年达 0.004ppm，终于在 1983 年第十七届国际计量大会上作出决定，将真空中的光速定为精确值。下面列表表示历年来真空中光速的测量结果。

表 15–2 历年来真空中光速的测量结果

年代	工作者	方法	结果（千米/秒）	不确定度（千米/秒）
1907	Rosa,Dorsey	esu/emu	299784	15
1928	Karolus 等	克尔盒	299786	15
1947	Essen 等	谐振腔	299792	4
1949	Aslakson	雷达	299792.4	2.4
1951	Bergstand	光电测距仪	299793.1	0.26
1954	Froome	微波干涉仪	299792.75	0.3
1964	Rank 等	带光谱	299792.8	0.4
1972	Bay 等	稳频 He-Ne 激光器	299792.462	0.018
1973		平差	299792.4580	0.0012
1974	Blaney	稳频 CO_2 激光器	299792.4590	0.0006
1976	Woods 等		299792.4588	0.0002
1980	Baird 等	稳频 He-Ne 激光器	299792.4581	0.0019
1983	国际协议		299792.458	（精确值）

2.普朗克常数

起初普朗克常数是用光谱、X 射线和电子衍射等不同方法测定的。通过如下关系可以确定普朗克常数：

测量 X 射线连续谱的极限，得 h/e；

电子衍射方法求德布罗意波长，得 $h/\sqrt{(em)}$；

从谱线精细结构常数，得 $e^2/(hc)$；

从光谱的里德伯常数，得 me^4/h^3c。

1962 年约瑟夫森效应发现后，从约瑟夫森频率 ν 可以求普朗克常数 h：$\nu = 2eV/h$，其中 V 为加在两弱耦合的超导体之间的直流电压。

由于普朗克常数无法直接测定，要从实验得到普朗克常数，总需通过一定的关系式间接推出，因此必然与其他基本物理常数有密切联系，特别是与电子的电荷值有联系，所以只有经过平差处理，才能得到和其他常数协调的普朗克常数。

下面列举几十年来普朗克常数的测定结果。

表 15–3　历年来普朗克常数的测量结果

年代	工作者	方法	结果(10^{-34}Js)	相对不确定度
1900	Planck	黑体辐射	6.55	
1916	Millikan	光电效应	6.547(6)	
1921	叶企孙等	X 射线连续谱	6.556(9)	
1955		平差	6.62517(23)	
1969		平差	6.626196(50)	7.5ppm
1973		平差	6.626176(36)	5.4ppm
1986		平差	6.6260755(40)	0.6PPm

3.电子电荷

电子发现于 1897 年。当时 J.J.汤姆生并没有能够直接测到电子电荷，后来用云雾法也只能确定其数量级，直到 1909 年密立根用油滴仪才得到精确结果。

1929 年，伯奇经过仔细研究，指出密立根用油滴仪得出的电子的电荷值 e=（4.772±0.005）×10^{-10}esu 与贝克林（Backlin）用 X 射线对晶体布拉格衍射得到的电子电荷值 e=（4.794±0.015）×10^{-10}esu 有系统偏差。他虽然最后还是采纳了密立根的结果作为平差值，但同时指出，应继续改进这两种方法，以查明分歧的起因究竟在那里。1931 年有人发现，原来是密立根在计算油滴运动时用的粘滞系数不正确。这一数据是密立根的研究生用扭秤实验测得的，这个研究生忽略了悬筒两端的粘滞阻力和附在悬筒上的空气所造成的阻力对转动惯量的影响。如果考虑这些因素对粘滞系数作出修正,正好可以弥补两种方法之间的偏差。表 15–4 举出历年来得出的电子电荷值。

表 15–4　历年来电子电荷的测量结果

年代	工作者	方法	结果(10^{-19}C)	相对不确定度
1917	Millikan	油滴仪	1.592(2)	
1930	Bearden	X 射线测晶体结构	1.603(1)	
1947		平差	1.60199(24)	
1950		平差	1.601864(23)	
1955		平差	1.60206(3)	
1963		平差	1.60210(2)	
1969		平差	1.6021917(70)	4.4ppm
1973		平差	1.6021892(46)	2.9ppm
1986		平差	1.60217733(49)	0.3ppm

4.里德伯常数

里德伯常数在光谱学和原子物理学中有重要地位，它是计算原子能

级的基础，是联系原子光谱和原子能级的桥梁。

1890 年瑞典的里德伯在整理多种元素的光谱系时，从以他的名字命名的里德伯公式得到了一个与元素无关的常数 R，人称里德伯常数。由于从一开始光谱的波长就测得相当精确，所以里德伯得到的这一常数达 7 位有效数字。

根据玻尔的原子模型理论也可从其他基本物理常数，例如电子电荷 e，电子荷质比 e/m，普朗克常数 h 等推出里德伯常数。理论值与实验值的吻合，成了玻尔理论的极好证据。

进一步研究，发现光谱有精细结构，后来又得到兰姆位移的修正，在实验中还运用到低温技术和同位素技术，同时光谱技术也有很大改进。从 30 年代到 50 年代，里德伯常数的测定不断有所改进。

然而最大的进步是激光技术的运用。稳频激光器和连续可调染料激光器的发明为更精确测定里德伯常数创造了条件。截至 1990 年，测定里德伯常数的不确定度已降至 10^{-4}ppm 以下。历年来测定结果如表 15–5。

表 15–5　历年来里德伯常数的测量结果

年代	工作者	方法	结果（cm^{-1}）	相对不确定度
1890	Rydberg	光谱	109721.6	
1921	Birge	光谱精细结构	109736.9	
1929	Birge	光谱精细结构	109737.42	
1952	Cohen	平差	109737.309(12)	0.11ppm
1969	Taylor	液氮，氘谱	109737.312(5)	0.046ppm
1972	Kessler	氦谱	109737.3177(83)	0.076ppm
1973		平差	109737.3177(83)	
1974	Hönsch	饱和吸收光谱	109737.3143(10)	9.1 × 10^{-3}ppm
1976	Goldsmith	偏振光谱法	109737.31476(32)	2.9 × 10^{-3}ppm
1981	Amin	交叉光谱法	109737.31521(11)	1.0 × 10^{-3}ppm
1986		平差	109737.31534(13)	1.2 × 10^{-3}ppm
1986	Zhao 等	交叉光谱法	109737.31569(7)	6.4 × 10^{-3}ppm
1989	Biraben 等	重新校对频率标准	109737.315709(18)	1.6 × 10^{-3}ppm

§15.4　物理学的新发现对基本常数的影响

如上所述，一套举世公认的基本物理常数，必然反映当代科学技术发展的水平，特别是物理实验技术的水平。纵观二十世纪的进程，物理学中一系列重大发现和发明对物理实验技术起了相当大的推动作用。例如：

X 射线衍射的发现,为精密测量电子电荷和阿佛伽德罗常数提供了重

要的基础。

由电子学和微波技术引发，1946 年发现了核磁共振，使 1955 年的基本物理常数中的磁矩和旋磁比的精确度有很大进展。用磁共振方法精确测定兰姆位移，对里德伯常数的测量也有重要影响。

1960 年激光器的发明，使真空中的光速和里德伯常数的测量上了新的台阶。

各种加速器的发明和建造，使基本粒子的质量、荷质比以及普朗克常数、精细结构常数等基本常数的精确度得到不断的提高。

50 年代铯原子钟的出现，大大推进了频率计量的精确性。

约瑟夫森效应的发现为普朗克常数、电子电荷以及其他与之有联系的基本常数都得到不同程度的提高。

量子霍尔效应的发现使基本物理常数又发生了飞跃，精细结构常数首先受益。约瑟夫森效应和量子霍尔效应成了基本物理常数计量中的两大支柱。这两个支柱又建立在高度精确的频率计量上。由于有这一系列的新效应新发现和新发明，基本物理常数的测定才达到 1986 年的新水平。

我们可以用下面图表来形象地表示基本物理常数的进步。

■图 15–3 基本物理常数随着科学技术的进步不断登上新台阶结束语

结束语

一、物理学史的研究有重要意义。一般来说。物理学是自然科学中的一门基础学科，处于核心地位。科学史很重要的部分就是物理学史，所以，研究物理学史有助于阐明科学发展的规律，有助于了解科学与社会的关系，科学与技术的关系，以及科学与哲学的关系。从学习物理学的角度来说，了解物理概念和理论的发展，不但可以加深对这些概念和理论的理解，而且可以进一步认识物理学这门学科的特点。作为未来物理学工作者或科技工作者的一员，更应该把握住物理学发展的趋势，了解它的动向，使自己自觉地推动物理学前进。著名美籍华裔物理学家杨振宁教授在谈到物理学史的意义时说：“中国物理学的发展中有些问题，根据我的普遍接触，有这么一个印象：前些年对国外的东西什么都想知道，结果弄得有点眼花缭乱，无所适从。其实有些介绍进来的东西，只是发展过程中的噪音，一转眼就消失了。

“其结果是对事物的来龙去脉弄不清楚，对主干发展看不清楚。可是不了解主干的发展，就不容易培养出有独到见解的学生。他们就会老是跟着许多噪音在乱转。现在国内学理论物理的学生那么多，太多了，我看他们成功的机会很少。如果能真正对国外的发展作些切实的介绍，我看会更有意义。”物理学和其他各门自然科学一样，正在发展之中，昨天的事情就是历史。了解过去，为的是把握住发展的脉络，预测未来的动向，从而端正自己的航向。杨振宁先生的讲话对我们物理学工作者很有实际意义，值得我们深思。

二、学习和研究物理学史，要注重历史资料。说话要有根据，不可想当然，乱发挥。要从史实出发，从史料的分析中找结论，切不可拿史料来凑结论。物理学史是一门科学，我们要持科学态度，实事求是，忌主观武断，提倡严谨作风，这样才能使物理学史真正发挥指导和借鉴的作用。这一点对从事物理学史工作的人有现实意义，对学习者和任何与之有关的各门学科的研究者，也是应该注意的。

三、学习物理学史不能代替本门业务的学习，只能对本科学习起辅助作用。物理学的课程基本上是按逻辑体系讲述，而物理学史则是按历史顺序编排。在横向联系的基础上再加一些纵向联系，使我们的知识立体化，知识就必然会得到加深和拓宽。这一补充确有价值，但不可喧宾夺主，否则就会本末倒置，变成夸夸其谈，舍本求末，失去了原来的用意。

四、学习物理学史，不要满足于增添了某些历史知识，也不只是为

---

① 转引自：曹天予，自然辩证法通讯，1985 年 5 期，79 页。

了加深对物理概念和规律的认识，更重要的是要从物理学的发展中找观点，找方法，找榜样，从前人的经验中受到启发。为此我们的学习应该是：

(1)靠自学，靠自己收集资料，自己研究，独立思考：(2)注重分析，开展学术争论，以开阔思路。切忌把物理学史的教学变成填鸭式，背诵条文，人云亦云。

(3)要注意学会用历史的方法。历史方法是科学研究的重要方法之一。收集和分析历史资料，是科学研究的一项基本功。每一位年轻人在做学位论文时大概都要首先对本门学科作一历史的回顾和发展的综述，以说明自己工作的意义，这就是历史的方法，物理学史的学习可以帮助你掌握这个方法。

五、找观点，就是学习前辈科学家在推动科学前进时是受什么思想支配的。他们为什么要研究这些问题？他们怎样看待这些问题？他们怎样处理理论与实验之间的分歧？他们怎样分析事物的矛盾？他们奋斗的目标是什么？例如：我们可以问问：他们追求的目标是什么？回答也许是：

(1)自然界的统一性。牛顿把各种力归结为近距力和远距力，他把天体吸引力和地球重力统一到一起，归结为万有引力。而万有引力和电力，磁力之间的统一性虽未找到，却启示了后人发现电力和磁力的平方反比定律。奥斯特在 1820 年发现电流的磁效应，并非偶然，而是受 19 世纪一种科学思潮的影响，认为自然力是统一的。他在 1803 年曾说过：“我们的物理学将不再是关于运动、热、空气、光、电、磁以及我们所知道的任何现象的零散汇总，而我们将把整个宇宙容纳在一个体系中。”他一直在寻找电和磁这两大自然力之间的联系，终于在实验中观察到了电流的磁效应。

法拉第也笃信自然“力”的统一性。在这一思想的推动下，他几经挫折，在 1845 年发现了磁场对光学偏振面的影响。这是第一个磁光效应，对电磁理论的发展起了相当大的作用。因为这个现象表明电，磁和光之间确实存在某种联系。他还信奉物理“力”的不可灭性和可转化性。他虽然在探索电力和重力之间的联系上未获成功，但他的思想发人深省。万有引力和电磁力以及其他几种力，例如弱相互作用和强相互作用能否取得统一，这正是当代物理学研究的重大课题之一。

(2)物理学家追求的第二个目标是自然规律的普遍性。例如对守恒定律的认识就是如此。从古代起自然哲学就有守恒的观念。能量守恒与转化定律，质量守恒与质能转化，动量守恒与角动量守恒等定律（或原理），都是物理学深入发展和综合研究的结果，而守恒的实质在于对称性，例如：

时间平移对称性（不变性）导致能量守恒；

空间平移对称性（不变性）导致动量守恒；

空间转动对称性（不变性）导致角动量守恒；

电磁场在规范变换下的对称性（不变性）导致电荷守恒，等等。

随着研究的深入，人们发现较低层次的对称性往往要进化到较高层次的对称性，相应的较低层次的守恒定律往往在一定条件之外并不守恒，而要归并到更高层次的守恒定律，例如：

机械能守恒定律→能量守恒与转化定律→质能转化关系；

1956 年李政道，杨振宁发现宇称不守恒→CP 联合守恒；

1964 年克罗宁发现 CP 联合不守恒→CPT 联合守恒。

从低级走向高级，从特殊走向一般，从表及里，从粗到精，这就是物理学进化的规律。

(3)物理学家追求的第三个目标是理论与实验的统一。在物理学中有一条准则，就是检验理论的客观标准，不是别的，而是实验。许多物理学家对于刚出现的新理论往往持怀疑态度，但一经实验证实就转而站在新理论一边。不过这里也要指出，并不是所有实验都是正确无误的。个别实验难免会有错误或料想不到的误差，这时必须慎重对待。爱因斯坦在对待考夫曼的电子质量随速度变化的实验结果时就采取了正确态度。实验是检验理论的标准这一提法没有错，应该全面地理解。检验理论的标准并不就是指某个具体的实验，正确地应该说实验作为一个整体对理论起检验作用。

六、找方法，就是从前辈科学家的创新活动中学习他们处理问题的方法。例如：

他们是怎样抓住新课题，从而把握科学发展新动态，发现新规律，新现象；

他们是怎样借鉴前人，总结历史的经验教训，从而找到新的途径；

他们是怎样对待矛盾，从矛盾的对立中找到突破口；

他们是怎样设计新实验，从而取得判决性实验结果的。

具体的研究方法也很值得学习：

对比方法是探索新现象的规律常用的方法。人们用移植的办法大大加快新兴领域的发展速度；

理想实验是科学推理的重要手段，反证法也是逻辑推理的有力工具。

方法有多种多样，为了达到某一目标，既可以采用这种方法，也可以采用那种方法，因势利导，辩证下药，通过物理学史的学习，可以进行比较，使自己从前人的活动中吸取经验，以利日后在需要时参考借鉴。你在平时注意学习研究，到了关键时刻，自会产生应有的作用。电子衍射的发现者之一 G.P.汤姆生指出：“研究科学史有许多理由，最好的理由是要从典型例子看科学发现是怎样作出的。我们需要了解许多实例，

因为道路有各种各样，很难找到什么捷径”。

七、找榜样，当然包括从各种典型案例中找典型人物，引为自己的榜样，树为自己的学习楷模。我这里指的是更广泛的涵义，既包括科学家的治学创业，也涉及他的为人处世。大科学家也是人，从小长大，各有其成长的过程。他们的成长道路对学生和教师有特殊的参考价值。科学家也有自己的喜怒哀乐。他对待困难和逆境的态度，他对名誉地位的看法，他坚持不懈，顽强拼搏的毅力，他灵活机动的风格，他敏锐的观察和一针见血的洞察力，他对祖国对人民的热爱，他的献身精神，等等，都值得我们学习和借鉴。

榜样的力量是巨大的。我们当然可以抽象出他们成功的共同要素，提炼成几条座右铭，但是重要的并不在于现成的结论，而在真正有所体会，变成自己的信条。所以应该是自己去吸取经验，真正做到心悦诚服。最好能深入了解一两位或几位物理学家，以他们为榜样，并在自己的实践中努力照着榜样做，这样你就可以得到鼓舞自己的力量。

1986 年诺贝尔化学奖获得者李远哲说过，他以前爱看科学家传记，其中居里夫人特别令他感动。

杨振宁在一次讲话中说：“常常有同学问我做物理工作成功的要素是什么？我想要素可以归纳为三个 P：

Perception，Persistence，and Power。

“Perception”——眼光，看准了什么东西，就要抓住不放；

“Persistence”——坚持，看对了要坚持；

“Power”——力量，有了力量能够闯过关，遇到困难你要闯过去”。[①]

爱因斯坦有一句名言，也许大家早就知道，有人问他成功的“秘诀”，他写了一个公式：

$$A=X+Y+Z$$

A 代表成功，X 代表艰苦的劳动，Y 代表正确的方法，Z 代表少说空话。这个公式概括了爱因斯坦的科学生涯。

1979 年诺贝尔物理奖获得者之一，弱电统一理论的提出者之一温伯格说过：物理学家很重要的一个素质是“进攻性”——对自然的“进攻性”。

学习物理学史，要比读科学家传记，对科学家的认识来得更深刻、更全面，因为这样就可以从科学发展的历史背景中去了解科学家的一生，了解他的活动和他所发挥的作用。我们要正确认识人物的历史作用，不要盲目崇拜，不要把大科学家神秘化，以为望尘莫及，高不可攀。他们确实比我们高明，但并不是不可学，当然学了也未必能有他们那样的

[①] 郭奕玲主编，杨振宁演讲录相《几位物理学家的故事》，1986 年

机会作出那样伟大的贡献，但是他们的精神总是可以运用到各种岗位上，指导你根据自己的条件做出相应的成就。

最后一点是要把自己摆进去，使物理学史的学习形成促进自己前进的动力。

学习物理学史，你应该有一种亲切感，似乎身临其境。那些历史人物和历史事件活生生地在你面前重现。你可以扪心自问，如果我自己处于那个时代遇到那样的问题我会怎样做，或者说今天我遇到类似的事情我该怎样做？

当然由于时代的不同，前人和我们的境遇会有相当大的差别。但是只要你用历史的眼光，对历史的条件作恰当的分析，你还是可以从中吸取智慧的。

学习物理学史可以使我们眼界开阔，思想活跃。

学习物理学史还应该联系我们自己的使命。我们认识到科学与社会的关系，自然会增加发展我国科学事业的紧迫感。我们中国起步比人家晚，就应该研究人家发展的历史，了解人家走过的道路，以便迎头赶上，不重犯人家犯过的错误。

作者在从事物理学史的工作时，常有以上的体会。我们寄希望于年轻一代，如果我们的一点劳动，有助于大家的进步，对大家有所裨益，我们就很高兴了。

附录物理学大事年表

约公元前 6 世纪，泰勒斯（Thales，公元前 624？—546）记述了摩擦后的琥珀吸引轻小物体和磁石吸铁的现象。

公元前 6 世纪，《管子》中总结和声规律。阐述标准调音频率，具体记载三分损益法。

约公元前 5 世纪，《考工记》中记述了滚动摩擦、斜面运动、惯性、浮力等现象。

公元前 5 世纪，德谟克利特（Democritus，公元前 460？—370？）提出万物由原子组成。

公元前 400 年，墨翟（公元前 478？—前 392？）在《墨经》中记载并论述了杠杆、滑轮、平衡、斜面、小孔成像及光色与温度的关系。

公元前 4 世纪，亚里士多德（Aristotle，前 384—前 322）在其所著

《物理学》中总结了若干观察到的事实和实际的经验。他的自然哲学支配西方近 2000 年。

公元前 3 世纪，欧几里得（Euclid，前 330？—前 260？）论述光的直线传播和反射定律。

公元前 3 世纪，阿基米德（Archimedes，前 287？—前 212）发明许多机械，包括阿基米德螺旋；发现杠杆原理和浮力定律；研究过重心。

公元前 3 世纪，古书《韩非子》记载有司南；《吕氏春秋》记有慈石召铁。

公元前 2 世纪，刘安（前 179—前 122）著《淮南子》，记载用冰作透镜，用反射镜作潜望镜，还提到人造磁铁和磁极斥力等。

1 世纪，古书《汉书》记载尖端放电、避雷知识和有关的装置。

1 世纪，王充（27—97）著《论衡》，记载有关力学、热学、声学、磁学等多方面的物理知识。

1 世纪，希龙（Heron，62—150）创制蒸汽旋转器，是利用蒸汽动力的最早尝试，他还制造过虹吸管。

2 世纪，托勒密（C.Ptolemaeus，100？—170？）发现大气折射。

2 世纪，张衡（78—139）创制地动仪，可以测报地震方位，创制浑天仪。

2 世纪，王符（85—162）著《潜夫论》分析人眼的作用。5 世纪，祖冲之（429—500），改造指南车，精确推算π值，在天文学上精确编制《大明历》。

8 世纪，王冰（唐代人）记载并探讨了大气压力现象。

11 世纪，沈括（1031—1095）著《梦溪笔谈》，记载地磁偏角的发现，凹面镜成像原理和共振现象等。

13 世纪，赵友钦（1279—1368）著《革象新书》，记载有他作过的光学实验以及光的照度、光的直线传播、视角与小孔成象等问题。

15 世纪，达·芬奇（L.daVinci，1452—1519）设计了大量机械，发明温度计和风力计，最早研究永动机不可能问题。

16 世纪，诺曼（R.Norman）在《新奇的吸引力》一书中描述了磁倾角的发现。

1583 年，伽利略（Galileo Galilei， 1564—1642）发现摆的等时性。

1586 年，斯梯芬（S.Stevin，1542—1620）著《静力学原理》，通过分析斜面上球链的平衡论证了
力的分解。

1593 年，伽利略发明空气温度计。

1600 年，吉尔伯特（W.Gilbert，1548—1603），著《磁石》一书，系统地论述了地球是个大磁石，描述了许多磁学实验，初次提出摩擦吸引轻物体不是由于磁力。

1605 年，弗·培根（F.Bacon，1561—1626）著《学术的进展》，提倡实验哲学，强调以实验为基础的归纳法，对 17 世纪科学实验的兴起起了很大的号召作用。

1609 年，伽利略，初次测光速，未获成功。

1609 年，开普勒（J.Kepler，1571—1630）著《新天文学》，提出开普勒第一、第二定律。

1619 年，开普勒著《宇宙谐和论》，提出开普勒第三定律。

1620 年，斯涅耳（W.Snell，1580—1626）从实验归纳出光的反射和折射定律。

1632 年，伽利略《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》出版，支持了地动学说，首先阐明了运动的相对性原理。

1636 年，麦森（M.Mersenne，1588—1648）测量声的振动频率，发现谐音，求出空气中的声速。

1638 年，伽利略的《两门新科学的对话》出版，讨论了材料抗断裂、媒质对运动的阻力、惯性原理、自由落体运动、斜面上物体的运动、抛射体的运动等问题，给出了匀速运动和匀加速运动的定义。

1643 年，托里拆利（E.Torricelli，1608—1647）和维维安尼（V.Viviani，1622—1703）提出气压概念，发明了水银气压

计。
1653 年，帕斯卡（B.Pascal，1623—1662）发现静止流体中压力传递的原理（即帕斯卡原理）。
1654 年，盖里克（O.V.Guericke，1602—1686）发明抽气泵，获得真空。
1658 年，费马（P.Fermat，1601—1665）提出光线在媒质中循最短光程传播的规律（即费马原理）。
1660 年，格里马尔迪（F.M.Grimaldi，1618—1663）发现光的衍射。
1662 年，波意耳（R.Boyle，1627—1691）实验发现波意耳定律。14 年后马略特（E.Mariotte，1620—1684）也独立地发现此定律。
1663 年，格里开作马德堡半球实验。
1666 年，牛顿（I.Newton，1642—1727）用三棱镜作色散实验。
1669 年，巴塞林那斯（E.Bartholinus）发现光经过方解石有双折射的
现象。
1675 年，牛顿作牛顿环实验，这是一种光的干涉现象，但牛顿仍用光的微粒说解释。
1676 年，罗迈（O.Roemer，1644—1710）发表他根据木星卫星被木星掩食的观测，推算出的光在真空中的传播速度。
1678 年，胡克（R.Hooke，1635—1703）阐述了在弹性极限内表示力和形变之间的线性关系的定律（即胡克定律）。
1687 年，牛顿在《自然哲学的数学原理》中，阐述了牛顿运动定律和万有引力定律。
1690 年，惠更斯（C.Huygens，1629—1695）出版《光论》，提出光的波动说，导出了光的直线传播和光的反射、折射定律，并解释了双折射现象。
1714 年，华伦海特（D.G.Fahrenheit，1686—1736）发明水银温度计，定出第一个经验温标——华氏温标。
1717 年，J.伯努利（J.Bernoulli，1667—1748）提出虚位移原理。
1738 年，D.伯努利（Daniel Bernoulli，1700—1782）的《流体动力学》出版，提出描述流体定常流动的伯努利方程。他设想气体的压力是由于气体分子与器壁碰撞的结果，导出了玻意耳定律。
1742 年，摄尔修斯（A.Celsius，1701—1744）提出摄氏温标。
1743 年，达朗伯（J.R.d’Alembert，1717—1783）在《动力学原理》中阐述了达朗伯原理。

1744 年，莫泊丢（P.L.M.Maupertuis，1698—1759）提出最小作用量原理。

1745 年，克莱斯特（E.G.v.Kleist，1700—1748）发明储存电的方法；次年马森布洛克（P.v.Musschenbroek，1692—1761）在莱顿又独立发明，后人称之为莱顿瓶。

1747 年，富兰克林（Benjamin Franklin，1706—1790 年）发表电的

单流质理论，提出“正电”和“负电”的概念。

1752 年，富兰克林作风筝实验，引天电到地面。

1755 年，欧拉（L.Euler，1707—1783）建立无粘流体力学的基本方程（即欧拉方程）。

1760 年，布莱克（J.Brack，1728—1799）发明冰量热器，并将温度和热量区分为两个不同的概念。

1761 年，布莱克提出潜热概念，奠定了量热学基础。

1767 年，普列斯特利（J.Priestley，1733—1804）根据富兰克林所做的“导体内不存在静电荷的实验”，推得静电力的平方反比定律。

1775 年，伏打（A.Volta，1745—1827）发明起电盘。

1775 年，法国科学院宣布不再审理永动机的设计方案。

1780 年，伽伐尼（A.Galvani，1737—1798）发现蛙腿筋肉收缩现象，认为是动物电所致，1791 年才发表。

1785 年，库仑（C.A.Coulomb，1736—1806）用他自己发明的扭秤，从实验得到静电力的平方反比定律。在这以前，米切尔（J.Michell，1724—1793）已有过类似设计，并于 1750 年提出磁力的平方反比定律。

1787 年，查理（J.A.C.Charles，1746—1823）发现气体膨胀的查理—盖·吕萨克定律。盖·吕萨克（Gay—lussac，1778—1850）的研究发表于 1802 年。

1788 年，拉格朗日（J.L.Lagrange，1736—1813）的《分析力学》出版。

1792 年，伏打研究伽伐尼现象，认为是两种金属接触所致。

1798 年，卡文迪什（H.Cavendish，1731—1810）用扭秤实验测定万有引力常数 G。

1798 年，伦福德（Count Rumford，即 B.Thompson，1753—1814）发表他的摩擦生热的实验，这些实验事实是反对热质说的重要依据。

1799 年，戴维（H.Davy，1778—1829）做真空中的摩擦实验，以证明热是物体微粒的振动所致。

1800 年，伏打发明伏打电堆。

1800 年，赫谢尔（W.Herschel，1788—1822）从太阳光谱的辐射热效应发现红外线。

1801 年，里特尔（J.W.Ritter，1776—1810）从太阳光谱的化学作用，发现紫外线。

1801 年，杨（T.Young，1773—1829）用干涉法测光波波长，提出光波干涉原理。

1802 年，沃拉斯顿（W.H.Wollaston，1766—1828）发现太阳光谱中有暗线。1808 年，马吕斯（E.J.Malus，1775—1812）发现光的偏振现象。

1811 年，布儒斯特（D.Brewster，1781—1868）发现偏振光的布儒斯特定律。

1815 年，夫琅和费（J.V.Fraunhofer，1787—1826）开始用分光镜研究太阳光谱中的暗线。

1815 年，菲涅耳（A.J.Fresnel，1788—1827）以杨氏干涉实验原理补充惠更斯原理，形成惠更斯–菲涅耳原理，圆满地解释了光的直线传播和光的衍射问题。

1819 年，杜隆（P.l.Dulong，1785—1838）与珀替（A.T.Petit，1791—1820）发现克原子固体比热是一常数，约为 6 卡/度·克原子，称杜隆·珀替定律。

1820 年，奥斯特（H.C.Oersted，1771—1851）发现导线通电产生磁效应。

1820 年，毕奥（J.B.Biot，1774—1862）和沙伐（F.Savart,1791—

1841）由实验归纳出电流元的磁场定律。

1820 年，安培（A.M.Ampère，1775—1836）由实验发现电流之间的相互作用力，1822 年进一步研究电流之间的相互作用，提出安培作用力定律。

1821 年，塞贝克（T.J.Seebeck，1770—1831）发现温差电效应（塞贝克效应）。

1821 年，菲涅耳发表光的横波理论。

1821 年，夫琅和费发明光栅。

1821 年，傅里叶（J.B.J.Fourier，1768—1830）的《热的分析理论》出版，详细研究了热在媒质中的传播问题。

1824 年，S.卡诺（S.Carnot，1796—1832）提出卡诺循环。

1826 年，欧姆（G.S.Ohm，1789—1854）确立欧姆定律。

1827 年，布朗（R.Brown，1773—1858）发现悬浮在液体中的细微颗粒不断地作杂乱无章运动。这是分子运动论的有力证据。

1830 年，诺比利（L.Nobili，1784—1835）发明温差电堆。
1831 年，法拉第（M.Faraday，1791—1867）发现电磁感应现象。
1833 年，法拉第提出电解定律。
1834 年，楞次（H.F.E.Lenz，1804—1865）建立楞次定则。
1834 年，珀耳帖（J.C.A.Peltier，1785—1845）发现电流可以致冷的珀耳帖效应。
1834 年，克拉珀龙（B.P.E.Clapeyton，1799—1864）导出相变的克拉珀龙方程。
1834 年，哈密顿（W.R.Hamilton，1805—1865）提出正则方程和用变分法表示的哈密顿原理。
1835 年，亨利（J.Henry，1797—1878）发现自感，1842 年发现电振荡放电。
1840 年，焦耳（J.P.Joule，1818—1889）从电流的热效应发现所产生的热量与电流的平方、电阻及时间成正比，称焦耳–楞次定律（楞次也独立地发现了这一定律）。其后，焦耳先后于 1843，1845，1847，1849，直至 1878 年，测量热功当量，历经 40 年，共进行四百多次实验。
1841 年，高斯（C.F.Gauss，1777—1855）阐明几何光学理论。
1842 年，多普勒（J.C.Doppler，1803—1853）发现多普勒效应。
1842 年，迈尔（R.Mayer，1814—1878）提出能量守恒与转化的基本思想。
1842 年，勒诺尔（H.V.Regnault，1810—1878）从实验测定实际气体的性质，发现与波意耳定律及盖·吕萨克定律有偏离。
1843 年，法拉第从实验证明电荷守恒定律。
1845 年，法拉第发现强磁场使光的偏振面旋转，称法拉第效应。
1846 年，瓦特斯顿（J.J.Waterston，1811—1883）根据分子运动论假说，导出了理想气体状态方程，并提出能量均分定理。
1849 年，斐索（A.H.Fizeau，1819—1896）首次在地面上测光速。
1851 年，傅科（J.L.Foucault，1819—1868）做傅科摆实验，证明地球自转。
1852 年，焦耳与 W.汤姆生（W.Thomson，1824—1907）发现气体焦耳–汤姆生效应（气体通过狭窄通道后突然膨胀引起温度变化）。
1853 年，维德曼（G.H.Wiedemann，1826—1899）和夫兰兹（R.Franz）发现，在一定温度下，许多金属的热导率和电导率的比值都是一个常数（即维德曼–夫兰兹定律）。
1855 年，傅科发现涡电流（即傅科电流）。
1857 年，韦伯（W.E.Weber，1804—1891）与柯尔劳胥

（R.H.A.Kohlrausch，1809—1858）测定电荷的静电单位和电磁单位之比，发现该值接近于真空中的光速。

1858 年，克劳修斯（R.J.E.Claüsius，1822—1888）引进气体分子的自由程概念。

1858 年，普吕克尔（J.Plücker，1801—1868）在放电管中发现阴极射线。

1859 年，麦克斯韦（J.C.Maxwell，1831—1879）提出气体分子的速度分布律。

1859 年，基尔霍夫（G.R.Kirchhoff，1824—1887）开创光谱分析，其后通过光谱分析发现铯、铷等新元素。他还发现发射光谱和吸收光谱之间的联系，建立了辐射定律。

1860 年，麦克斯韦发表气体中输运过程的初级理论。

1861 年，麦克斯韦引进位移电流概念。

1864 年，麦克斯韦提出电磁场的基本方程组（后称麦克斯韦方程组），并推断电磁波的存在，预测光是一种电磁波，为光的电磁理论奠定了基础。

1866 年，昆特（A.Kundt，1839—1894）做昆特管实验，用以测量气体或固体中的声速。

1868 年，玻尔兹曼（L.Boltzmann，1844—1906）推广麦克斯韦的分子速度分布律，建立了平衡态气体分子的能量分布律——玻尔兹曼分布律。

1869 年，安德纽斯（T.Andrews，1813—1885）由实验发现气–液相变的临界现象。

1869 年，希托夫（J.W.Hittorf，1824—1914）用磁场使阴极射线偏转。

1871 年，瓦尔莱（C.F.Varley，1828—1883）发现阴极射线带负电。

1872 年，玻尔兹曼提出输运方程（后称为玻尔兹曼输运方程）、H 定理和熵的统计诠释。

1873 年，范德瓦耳斯（J.D.VanderWaals，1837—1923）提出实际气体状态方程。

1875 年，克尔（J.Kerr，1824—1907）发现在强电场的作用下，某些各向同性的透明介质会变为各向异性，从而使光产生双折射现象，称克尔电光效应。

1876 年，哥尔茨坦（E.Goldstein，1850—1930）开始大量研究阴极射线的实验，导致极坠射线的发现。

1876—1878 年，吉布斯（J.W.Gibbs，1839—1903）提出化学势的概念、相平衡定律，建立了粒子数可变系统的热力学基本方

程。

1877 年，瑞利（J.W.S.Rayleigh，1842—1919）的《声学原理》出版，为近代声学奠定了基础。

1879 年，克鲁克斯（W.Crookes，1832—1919）开始一系列实验，研究阴极射线。

1879 年，斯忒藩（J.Stefan,1835—1893）建立了黑体的面辐射强度与绝对温度关系的经验公式，制成辐射高温计，测得太阳表面温度约为 6000℃；

1884 年玻尔兹曼从理论上证明了此公式，后称为斯忒藩–玻尔

兹

曼定律。

1879 年，霍尔（E.H.Hall，1855—1938）发现电流通过金属，在磁场作用下产生横向电动势的霍尔效应。

1880 年，居里兄弟（P.Curie，1859—1906；J.Curie，1855—1941）发现晶体的压电效应。

1881 年，迈克耳孙（A.A.Michelson，1852—1931）首次做以太漂移实验，得零结果。由此产生迈克耳孙干涉仪，灵敏度极高。

1885 年，迈克耳孙与莫雷（E.W.Morley，1838—1923）合作改进斐索流水中光速的测量。

1885 年，巴耳末（J.J.Balmer，1825—1898）发表已发现的氢原子可见光波段中 4 根谱线的波长公式。

1887 年，迈克耳孙与莫雷再次做以太漂移实验，又得零结果。

1887 年，赫兹（H.Hertz，1857—1894）作电磁波实验，证实麦克斯韦的电磁场理论。同时，赫兹发现光电效应。

1890 年，厄沃（B.R.EÖtvÖs）作实验证明惯性质量与引力质量相等。

1890 年，里德伯（R.J.R.Rydberg，1854—1919）发表碱金属和氢原子光谱线通用的波长公式。

1893 年，维恩（W.Wien，1864—1928）导出黑体辐射强度分布与温度关系的位移定律。

1893 年，勒纳德（P.Lenard，1862—1947）研究阴极射线时，在射线管上装一薄铝窗，使阴极射线从管内穿出进入空气，射程约 1 厘米，人称勒纳德射线。

1895 年，洛仑兹（H.A.Lorentz，1853—1928）发表电磁场对运动电荷作用力的公式，后称该力为洛伦兹力。

1895 年，P.居里发现居里点和居里定律。

1895 年，伦琴（W.K.RÖntgen，1845—1923）发现 X 射线。

1896 年，维恩发表适用于短波范围的黑体辐射的能量分布公式。

1896 年，贝克勒尔（A.H.Becquerel，1852—1908）发现放射性。

1896 年，塞曼（P.Zeeman，1865—1943）发现磁场使光谱线分裂，称塞曼效应。

1896 年，洛仑兹创立经典电子论。

1897 年，J.J.汤姆生（J.J.Thomson，1856—1940）从阴极射线证实电子的存在，测出的荷质比与塞曼效应所得数量级相同。其后他又进一步从实验确证电子存在的普遍性，并直接测量电子电荷。

1898 年，卢瑟福（E.Rutherford，1871—1937）揭示铀辐射组成复杂，他把“软”的成分称为α射线，“硬”的成分称为β射线。

1898 年，居里夫妇（P.Curie 与 M.S.Curie，1867—1934）发现放射性元素镭和钋。

1899 年，列别捷夫（A.A.Лебедев，1866—1911）实验证实光压的存在。1899 年，卢梅尔（O.Lummer，1860—1925）与鲁本斯（H.Rubens，1865—1922）等人做空腔辐射实验，精确测得辐射能量分布曲线。

1900 年，瑞利发表适用于长波范围的黑体辐射公式。

1900 年，普朗克（M.Planck，1858—1947）提出了符合整个波长范围的黑体辐射公式，并用能量量子化假设从理论上导出了这个公式。

1900 年，维拉尔德（P.Villard，1860—1934）发现γ射线。

1901 年，考夫曼（W.Kaufmann，1871—1947）从镭辐射测β射线在电场和磁场中的偏转，从而发现电子质量随速度变化。

1901 年，理查森（O.W.Richardson，1879—1959）发现灼热金属表面的电子发射规律。后经多年实验和理论研究，又对这一定律作进一步修正。

1902 年，勒纳德从光电效应实验得到光电效应的基本规律：电子的最大速度与光强无关，为爱因斯坦的光量子假说提供实验基础。

1902 年，吉布斯出版《统计力学的基本原理》，创立统计系综理论。

1903 年，卢瑟福和索迪（F.Soddy，1877—1956）发表元素的嬗变理论。

1905 年，爱因斯坦（A.Einstein,1879—1955）发表关于布朗运动的论文，并发表光量子假说，解释了光电效应等现象。

1905 年，朗之万（P.Langevin，1872—1946）发表顺磁性的经典理论。

1905 年，爱因斯坦发表《关于运动媒质的电动力学》一文，首次提出狭义相对论的基本原理，发现质能之间的相当性。

1906 年，爱因斯坦发表关于固体热容的量子理论。

1907 年，外斯（P.E.Weiss，1865—1940）发表铁磁性的分子场理论，提出磁畴假设。

1908 年，昂纳斯（H.Kammerlingh—Onnes，1853—1926）液化了最后一种“永久气体”氦。

1908 年，佩兰（J.B.Perrin，1870—1942）实验证实布朗运动方程，求得阿佛伽德罗常数。

1908—1910 年，布雪勒（A.H.Bucherer，1863—1927）等人，分别精确测量出电子质量随速度的变化，证实了洛仑兹–爱因斯坦的质量变化公式。

1908 年，盖革（H.Geiger，1882—1945）发明计数管。卢瑟福等人从α粒子测定电子电荷 e 值。

1906—1917 年，密立根（R.A.Millikan，1868—1953）测单个电子电荷值，前后历经 11 年，实验方法做过三次改革，做了上千次数据。

1909 年，盖革与马斯登（E.Marsden）在卢瑟福的指导下，从实验发现α粒子碰撞金属箔产生大角度散射，导致 1911 年卢瑟福提出有核原子模型的理论。这一理论于 1913 年为盖革和马斯登的实验所证实。

1911 年，昂纳斯发现汞、铅、锡等金属在低温下的超导电性。

1911 年，威尔逊（C.T.R.Wilson，1869—1959）发明威尔逊云室，为核物理的研究提供了重要实验手段。

1911 年，赫斯（V.F.Hess，1883—1964）发现宇宙射线。

1912 年，劳厄（M.V.Laue，1879—1960）提出方案，弗里德里希（W.Friedrich），尼平（P.Knipping，1883—1935）进行 X 射线衍射实验，从而证实了 X 射线的波动性。

1912 年，能斯特（W.Nernst，1864—1941）提出绝对零度不能达到定律（即热力学第三定律）。

1913 年，斯塔克（J.Stark，1874—1957）发现原子光谱在电场作用下的分裂现象（斯塔克效应）。

1913 年，玻尔（N.Bohr，1885—1962）发表氢原子结构理论，解释了氢原子光谱。

1913 年，布拉格父子（W.H.Bragg，1862—1942；W.L.Bragg，1890—1971）研究 X 射线衍射，用 X 射线晶体分光仪，测定 X 射线衍射角，根据布拉格公式：$2d\sin\theta=\lambda$ 算出晶格常数 d。

1914 年，莫塞莱（H.G.J.Moseley，1887—1915）发现原子序数与元素辐射特征线之间的关系，奠定了 X 射线光谱学的基础。

1914 年，弗朗克（J.Franck，1882—1964）与 G.赫兹（G.Hertz，1887—1975）测汞的激发电位。

1914 年，查德威克（J.Chadwick，1891—1974）发现 β 能谱。
1914 年，西格班（K.M.G.Siegbahn，1886—1978）开始研究 X 射线光谱学。
1915 年，在爱因斯坦的倡仪下，德哈斯（W.J.deHaas，1878—1960）首次测量回转磁效应。
1915 年，爱因斯坦建立了广义相对论。
1916 年，密立根用实验证实了爱因斯坦光电方程。
1916 年，爱因斯坦根据量子跃迁概念推出普朗克辐射公式，同时提出了受激辐射理论，后发展为激光技术的理论基础。
1916 年，德拜（P.J.W.Debye，1884—1966）提出 X 射线粉末衍射法。
1919 年，爱丁顿（A.S.Eddington，1882—1944）等人在日食观测中证实了爱因斯坦关于引力使光线弯曲的预言。
1919 年，阿斯顿（F.W.Aston，1877—1945）发明质谱仪，为同位素的研究提供重要手段。
1919 年，卢瑟福首次实现人工核反应。
1919 年，巴克豪森（H.G.Barkhausen）发现磁畴。
1921 年，瓦拉塞克发现铁电性。
1922 年，斯特恩（O.Stern，1888—1969）与盖拉赫（W.Gerlach，1889—1979）使银原子束穿过非均匀磁场，观测到分立的磁矩，从而证实空间量子化理论。
1923 年，康普顿（A.H.Compton，1892—1962）用光子和电子相互碰撞解释 X 射线散射中波长变长的实验结果，称康普顿效应。
1924 年，德布罗意（L.deBroglie，1892—1987）提出微观粒子具有波粒二象性的假设。
1924 年，玻色（S.Bose，1894—1974）发表光子所服从的统计规律，后经爱因斯坦补充建立了玻色–爱因斯坦统计。
1925 年，泡利（W.Pauli，1900—1958）发表不相容原理。
1925 年，海森伯（W.K.Heisenberg，1901—1976）创立矩阵力学。
1925 年，乌伦贝克（G.E.Uhlenbeck，1900—）和高斯密特（S.A.Goudsmit，1902—1979）提出电子自旋假设。
1926 年，薛定谔（E.Schrodinger，1887—1961）发表波动力学，证明矩阵力学和波动力学的等价性。
1926 年，费米（E.Fermi，1901—1954）与狄拉克（P.A.M.Dirac，1902—1984）独立提出费米–狄拉克统计。
1926 年，玻恩（M.Born，1882—1970）发表波函数的统计诠释。
1927 年，海森伯发表不确定原理。

1927 年，玻尔提出量子力学的互补原理。

1927 年，戴维森（C.J.Davisson，1881—1958）与革末（L.H.Germer，1896—1971）用低速电子进行电子散射实验，证实了电子衍射。同年，G.P.汤姆生（G.P.Thomson，1892—1975）用高速电子获电子衍射花样。

1928 年，拉曼（C.V.Raman，1888—1970）等人发现散射光的频率变化，即拉曼效应。

1928 年，狄拉克发表相对论电子波动方程，把电子的相对论性运动和自旋、磁矩联系了起来。

1928—1930 年，布洛赫（F.Bloch，1905—1983）等人为固体的能带理论奠定了基础。

1930—1931 年，狄拉克提出正电子的空穴理论和磁单极子理论。

1931 年，A.H.威尔逊（A.H.Wilson）提出金属和绝缘体相区别的能带模型，并预言介于两者之间存在半导体，为半导体的发展提供了理论基础。

1931 年，劳伦斯（E.O.Lawrence，1901—1958）等人建成第一台回旋加速器。

1932 年，考克拉夫特（J.D.Cockcroft，1897—1967）与沃尔顿（E.T.Walton）发明高电压倍加器，用以加速质子，实现人工核蜕变。

1932 年，尤里（H.C.Urey，1893—1981）将天然液态氢蒸发浓缩后，发现氢的同位素——氘的存在。

1932 年，查德威克发现中子。在这以前，卢瑟福于 1920 年曾设想原子核中还有一种中性粒子，质量大体与质子相等。据此曾安排实验，但未获成果。

1930 年，玻特（W.Bothe，1891—1957）等人在α射线轰击铍的实验中，发现过一种穿透力极强的射线，误认为γ射线，1931 年约里奥（F.Joliot，1900—1958）与伊伦·居里（l.Curie，1897—1956）让这种穿透力极强的射线，通过石蜡，打出高速质子。查德威克接着做了大量实验，并用威尔逊云室拍照，以无可辩驳的事实说明这一射线即是卢瑟福预言的中子。

1932 年，安德森（C.D.Anderson，1905—）从宇宙线中发现正电子，证实狄拉克的预言。

1932 年，诺尔（M.Knoll）和鲁斯卡（E.Ruska）发明透射电子显微镜。

1932 年，海森伯、伊万年科（Д.Д.Иваненко）独立发表原

子核由质子和中子组成的假说。

1933 年，泡利在索尔威会议上详细论证中微子假说，提出β衰变。
1933 年，盖奥克（W.F.Giauque）完成了顺磁体的绝热去磁降温实验，获得千分之几开的低温。
1933 年，迈斯纳（W.Meissner，1882—1974）和奥克森菲尔德（R.Ochsenfeld）发现超导体具有完全的抗磁性。
1933 年，费米发表β衰变的中微子理论。
1933 年，图夫（M.A.Tuve）建立第一台静电加速器。
1933 年，布拉开特（P.M.S.Blackett，1897—1974）等人从云室照片中发现正负电子对。
1934 年，切仑柯夫（П.А.Черенков）发现液体在β射线照

射下发光的一种现象，称切仑柯夫辐射。
1934 年，约里奥–居里夫妇发现人工放射性。
1935 年，汤川秀树发表了核力的介子场论，预言了介子的存在。
1935 年，F.伦敦和 H.伦敦发表超导现象的宏观电动力学理论。
1935 年，N.玻尔提出原子核反应的液滴核模型。
1938 年，哈恩（O.Hahn,1879—1968）与斯特拉斯曼（F.Strassmann）发现铀裂变。
1938 年，卡皮查（П.Л.Капича，1894—）实验证实氦的超流动性。
1938 年，F.伦敦提出解释超流动性的统计理论。
1939 年，迈特纳（L.Meitner,1878—1968）和弗利胥（O.Frisch）根据液滴核模型指出，哈恩–斯特拉斯曼的实验结果是一种原子核的裂变现象。
1939 年，奥本海默（J.R.Oppenheimer，1904—1967）根据广义相对论预言了黑洞的存在。
1939 年，拉比（I.I.Rabi，1898—1987）等人用分子束磁共振法测核磁矩。
1940 年，开尔斯特（D.W.Kerst）建造第一台电子感应加速器。
1940—1941 年，朗道（Л.Д.Ландау,1908—1968）提出氦 II 超流性的量子理论。
1941 年，布里奇曼（P.W.Bridgeman，1882—1961）发明能产生 10 万巴高压的装置。
1942 年，在费米主持下美国建成世界上第一座裂变反应堆。
1944—1945 年，韦克斯勒（В.И.Векслер，1907—1966）和麦克米伦（E.M.McMillan，1907—）各自独立提出自动稳相原理，为高能加速器的发展开辟了道路。
1946 年，阿尔瓦雷兹（L.W.Alvarez，1911—）制成第一台质子直

线加速器。

1946 年，珀塞尔（E.M.Purcell）用共振吸收法测核磁矩，布洛赫（F.Bloch，1905—1983）用核感应法测核磁矩，两人从不同的角度实现核磁共振。这种方法可以使核磁矩和磁场的测量精度大大提高。

1947 年，库什（P.Kusch）精确测量电子磁矩，发现实验结果与理论预计有微小偏差。

1947 年，兰姆（W.E.Lamb，Jr.）与雷瑟福（R.C.Retherford）用微波方法精确测出氢原子能级的差值，发现狄拉克的量子理论仍与实际有不符之处。这一实验为量子电动力学的发展提供了实验依据。

1947 年，鲍威尔（C.F.Powell，1903—1969）等用核乳胶的方法在宇宙线中发现π介子。

1947 年，罗彻斯特和巴特勒（C.Butler，1922—）在宇宙线中发现奇异粒子。

1947 年，H.P.卡尔曼和 J.W.科尔特曼等发明闪烁计数器。1947 年，普里高金（I.Prigogine，1917—）提出最小熵产生原理。

1948 年，奈耳（L.E.F.Neel，1904—）建立和发展了亚铁磁性的分子场理论。

1948 年，张文裕发现μ子系弱作用粒子，并发现了μ⁻子原子。

1948 年，肖克利（W.Shockley），巴丁（J.Bardeen）与布拉顿（W.H.Brattain）发明晶体三极管。

1948 年，伽柏（D.Gabor，1900—1979）提出现代全息照相术前身的波阵面再现原理。

1948 年，朝永振一郎、施温格（J.Schwinger）费因曼（R.P.Feynman，1918—1988）等分别发表相对论协变的重正化的量子电动力学理论，逐步形成消除发散困难的重正化方法。

1949 年，迈耶（M.G.Mayer）和简森（J.H.D.Jensen）等分别提出核壳层模型理论。

1952 年，格拉塞（D.A.Glaser）发明气泡室，比威尔逊云室更为灵敏。

1952 年，A.玻尔和莫特尔逊（B.B.Mottelson）提出原子核结构的集体模型。

1954 年，杨振宁和密耳斯（R.L.Mills）发表非阿贝耳规范场理论。

1954 年，汤斯（C.H.Townes）等人制成受激辐射的微波放大器——脉塞。

1955 年，张伯伦（O.Chamberlain）与西格雷（E.G.Segrè，1905—）等人发现反质子。

1955 年，李政道、杨振宁提出弱相互作用中宇称不守恒。

1956 年，吴健雄等人实验验证了李政道杨振宁提出的弱相互作用中宇称不守恒的理论。

1957 年，巴丁、施里弗和库珀发表超导微观理论（即 BCS 理论）。

1958 年，穆斯堡尔（R.L.MÖssbauer）实现 γ 射线的无反冲共振吸收（穆斯堡尔效应）。

1959 年，王淦昌、王祝翔、丁大钊等发现反西格马负超子。

1960 年，梅曼（T.H.Maiman）制成红宝石激光器，实现了肖洛（A.L.Schawlow）和汤斯 1958 年的预言。

1962 年，约瑟夫森（B.D.Josephson）发现约瑟夫森效应。

1964 年，盖耳曼（M.Gell–Mann）等提出强子结构的夸克模型。

1964 年，克洛宁（J.W.Cronin）等实验证实在弱相互作用中 CP 联合变换守恒被破坏。

1967—1968 年，温伯格（S.Weinberg）、萨拉姆（A.Salam）分别提出电弱统一理论标准模型。

1969 年，普里高金首次明确提出耗散结构理论。

1973 年，哈塞尔特（F.J.Hasert）等发现弱中性流，支持了电弱统一

理论。

1974 年，丁肇中（1936—）与里希特（B.Richter，1931—）分别发现 J/ψ 粒子。

1980 年，克利青（V.Klitzing，1943—）发现量子霍尔效应。

1983 年，鲁比亚（C.Rubbia，1934—）和范德梅尔（S.V.d.Meer，1925—）等人在欧洲核子研究中心发现 $W^{\pm}$ 和 Z^0 粒子。